



Energie solaire et observation de la terre

Philippe Blanc

► To cite this version:

Philippe Blanc. Energie solaire et observation de la terre. domain_spi.energ. Mines ParisTech; Université Grenoble Alpes, 2015. tel-01250746

HAL Id: tel-01250746

<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/tel-01250746>

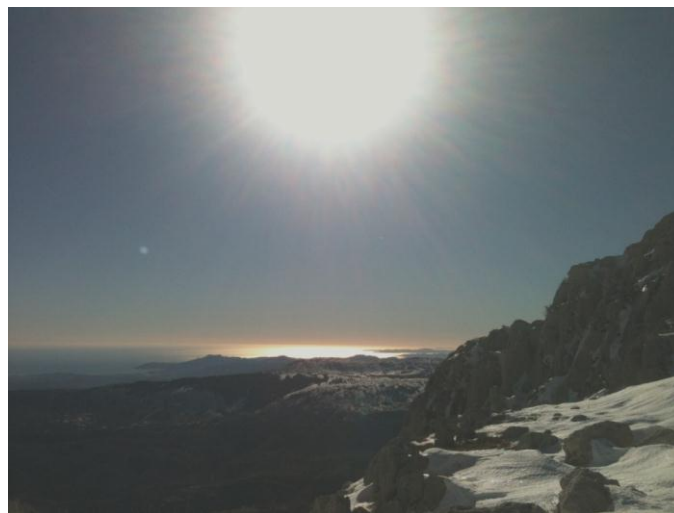
Submitted on 5 Jan 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MEMOIRE D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES
UNIVERSITE GRENOBLE ALPES - ECOLE DOCTORALE EEATS

ENERGIE SOLAIRE ET OBSERVATION DE LA TERRE



Dr Philippe BLANC

*Responsable des activités de recherche sur l'évaluation
des ressources énergétiques renouvelables*

Centre Observation, Impacts, Energie
MINES ParisTech, PSL Research University

16 décembre 2015

JURY :

M. Daniel LINCOT
M. René GARELLO
M. Philippe LAURET
M. Dominique DUMORTIER
M. Olivier BOUCHER
M. Martial HAEFFELIN
M. Lucien WALD
M. Jocelyn CHANUSSOT

Directeur de recherche, CHIMIE ParisTech
Professeur, Telecom Bretagne
Professeur, Université de La Réunion
Docteur HDR, ENTPE
Directeur de recherche, UPMC
Docteur HDR, Ecole Polytechnique
Professeur, MINES ParisTech
Professeur, Université de Grenoble

Président
Rapporteur
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

REMERCIEMENTS

*« N'oublie pas que chaque nuage, si noir soit-il, a toujours une face ensoleillée, tournée vers le ciel »
Friedrich Wilhelm Weber*

*« Jamais le Soleil ne voit d'ombre »
Léonard de Vinci*

Ecrire les remerciements est un exercice que l'on réalise à la fin d'un projet. La soutenance pour l'habilitation à diriger des recherches s'étant déroulée avec succès, c'est le moment de se souvenir et surtout de ne rien oublier ... enfin, j'espère.

Je remercie en premier lieu M. René Garello de Telecom Bretagne, M. Philippe Lauret de l'université de la Réunion et M. Dominique Dumortier de l'ENTPE qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de mon mémoire pour la candidature à l'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR). Je remercie également chaleureusement les autres membres du jury qui ont accepté d'assister, avec les trois rapporteurs, à ma soutenance orale en tant qu'examinateur : M. Olivier Boucher de l'Université Pierre et Marie Curie, M. Martial Haefflelin de l'Ecole Polytechnique, M. Daniel Lincot de CHIMIE ParisTech, M. Jocelyn Chanussot de l'Université de Grenoble et enfin M. Lucien Wald de MINES ParisTech.

Je n'oublie pas l'Université Grenoble Alpes et son école doctorale EEATS pour avoir accepté ma candidature au diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches et pour avoir consenti à ce que la soutenance puisse se dérouler sur le site de MINES ParisTech à Sophia Antipolis. Plus particulièrement, j'adresse un grand merci une nouvelle fois à M. Jocelyn Chanussot mais aussi à M. Pierre-Yves Coulon et à Mme Bénédicte Fluxa pour m'avoir guidé et aidé dans le parcours administratif d'inscription et de soutenance.

Comme à l'issue de ma thèse de doctorat de troisième cycle en 1999, je souligne le rôle capital de Lucien Wald. Il a su me guider dans l'apprentissage du métier de chercheur, avec beaucoup de patience, de sincérité et de pédagogie. Sa démarche scientifique pragmatique et profondément honnête –et parfois très subtile–, ainsi que son contact humain et bienveillant avec les autres reste pour moi définitivement un modèle à suivre.

C'est l'occasion aussi de coucher par écrit tout le bien que je pense de l'ambiance collégiale empreint de bonne humeur et de solidarité qui règne au sein du centre de recherche Observation, Impacts, Energie. J'adresse d'ailleurs toute ma sympathie à l'ensemble de l'équipe : Thierry, Lionel, Pierre, Benoît, Mireille, Jean, Isabelle, Sandra, William, Youva, Marc, Loïc et Marc, sans oublier bien entendu Roseline, Michel, Etienne, Laurent, Claire, Mathilde ainsi que tous les anciens étudiants en thèse ou en stage que j'ai encadrés ou côtoyés dans le centre.

Merci à mes parents pour avoir courageusement –et si efficacement– relu le mémoire et pour avoir organisé avec ma tante, mon oncle, mes beaux-parents et ma femme un pot de HDR mémorable et ... magistral !

Mes derniers remerciements vont à Sandrine, ma femme, pour sa patience, sa relecture efficace du mémoire, ses conseils avisés et surtout pour son soutien capital et sans faille.

Je dédie d'ailleurs ce mémoire à Sandrine ainsi qu'à nos filles, Lisa et Clara.

TABLE DES MATIERES

LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX	7
INTRODUCTION	11
CHAPITRE I - SYNTHESE DES TRAVAUX SCIENTIFIQUES	13
1. ACTIVITES DE RECHERCHE PASSEES DANS L'INDUSTRIE	13
2. ACTIVITES DE RECHERCHE ACTUELLES	13
2.1 Evaluation de la ressource solaire et quelques verrous scientifiques	14
2.2 Etablissement d'un atlas du rayonnement solaire local à haute résolution spatiale en région PACA	25
2.2.1 Description des données utilisées	26
2.2.2 Augmentation de la résolution spatiale par la prise en compte de l'orographie	27
2.2.3 Résultats et analyse des incertitudes	30
2.2.4 Conclusion	33
2.3 Etablissement d'une nouvelle méthode : Heliosat-4	34
2.3.1 Découplage des effets des nuages et de ceux de l'atmosphère claire (sans nuage)	35
2.3.2 McClear : le modèle d'éclairement par ciel clair	36
2.3.3 McCloud : le modèle des effets des nuages et de l'albédo du sol	45
2.3.4 Validation de la méthode Heliosat-4	48
2.3.5 Conclusion	48
2.4 Instrumentation <i>in-situ</i>	50
2.5 Conclusion	59
CHAPITRE II - DISSEMINATION ET IMPACTS SOCIETAUX	61
1. DISSEMINATION DES DONNEES DE RAYONNEMENT SOLAIRE VIA DES SERVICES WEB	61
2. TRANSFERTS D'EXPERTISE VERS LA SPHERE ECONOMIQUE	63
2.1 Transfert vers Transvalor Innovation	63
2.2 « Solar Training » : formation au rayonnement solaire en direction des PME	64
2.3 Participation à la tâche 46 du programme SHC de l'AIE	64
3. CONTRIBUTIONS A LA TRANSITION ENERGETIQUE	65
CHAPITRE III - PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES ET PROJETS	67
1. CARACTERISATION DE LA RESSOURCE SOLAIRE	67
1.1 Vers une modélisation de la distribution spectrale du rayonnement solaire	67
1.2 Vers une modélisation de la distribution angulaire du rayonnement solaire	68
1.3 Exploitation des capacités étendues des nouveaux satellites météorologiques géostationnaires	70
2. PREVISION DU RAYONNEMENT SOLAIRE	72
3. CONCLUSION	75
CHAPITRE IV - CURRICULUM VITAE DETAILLE	77
1. MINI-CV	77
2. LISTE DES PUBLICATIONS ET BREVETS	78
2.1 Articles dans des revues à comité de lecture de rang A ⁴	78
2.2 Autres articles dans des revues à comité de lecture	80
2.3 Articles dans des revues sans comité de lecture	80
2.4 Ouvrages scientifiques collectifs	80
2.5 Brevets	81
2.6 Communications dans des colloques internationaux avec actes	81
2.7 Communications internationales sans actes	84
2.8 Conférences invitées nationales et internationales	86
2.9 Base de données et services web scientifiques de référence	86
2.10 DEA et thèse de doctorat	87
2.11 Références bibliographiques en ligne	87
3. LISTE DES TRAVAUX DE RECHERCHE	87
4. RAYONNEMENT, ACTIONS SCIENTIFIQUES NATIONALES ET INTERNATIONALES	91
4.1 Participation à des comités d'experts internationaux	91
4.2 Participation à des comités de lecture de journaux scientifiques internationaux	91
4.3 Participation à des actions scientifiques nationales	91
4.4 Organisation de séminaires internationaux	92

4.5	Accueils de chercheurs invités étrangers	92
4.6	Distinctions	93
5.	ENCADREMENTS ET ENSEIGNEMENTS	93
5.1	Encadrements de thèses	93
5.2	Participation à des jurys de thèse	95
5.3	Encadrements et tutorats de stages de fin d'étude de niveau MASTER II	96
5.4	Enseignements	97
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		99

LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1 :	Représentation schématique des échelles spatiales et temporelles accessibles par différents moyens de caractérisation de la ressource solaire.....	15
Figure 2 :	(a) Représentation des stations de mesures HOPE (points noirs) et des différents supports spatiaux considérés pour la comparaison avec HelioClim-3. (b) Erreur quadratique moyenne relative pour les différents supports spatiaux (1 : 1km, 2 : 2 km, 3 : 4 km et 4 : 6 km) et temporels (15 min, 30 min, 1 h, 2h, 6 h et 24 h).....	17
Figure 3 :	Diagramme en boîtes à moustache représentant les biais (a) et les erreurs quadratiques moyennes (b) des estimations de l'éclairement moyen sur 15 min de HelioClim-3, calculés mensuellement et exprimés en valeur relative à la moyenne des mesures correspondantes de 13 stations du réseau BSRN (<i>Baseline Surface Radiation Network</i>).	19
Figure 4 :	Diagramme de dispersion entre les indices de clarté issus de HelioClim-3 et ceux dérivés de mesures <i>in-situ</i> . La couleur des points correspond à la densité des points en échelle log (du moins dense en bleu au plus dense en rouge).	20
Figure 5 :	Schéma simplifié des effets de parallaxes sur la géolocalisation des nuages et sur leurs ombres portées.	21
Figure 6 :	Sensibilités spectrales typiques de différentes cellules photovoltaïques (source : Meydbray et Emery, 2012).....	22
Figure 7 :	Localisation en région PACA des stations de mesures pyranométriques utilisées pour l'étalonnage et l'analyse des incertitudes (stations Météo-France en bleu ; stations RSI en rouge).	26
Figure 8 :	Comparaison des relevés par théodolites et par calcul à partir du MNT SRTM v4 à Corte (a) et Soviera (b) en Corse. Les relevés par théodolites ont été effectués par un doctorant de l'université de Corse, Pierrick Haurant.....	29
Figure 9 :	Exemple de superposition de l'horizon (en noir) calculé avec le MNT SRTM v4 à Soviera (Corse) avec la course du Soleil au cours de l'année (en jaune).	29
Figure 10 :	Carte de la moyenne multi-annuelle (2004-2010) de l'irradiation globale horizontale (GHI) annuelle exprimée en kWh/m ²).	30
Figure 11 :	Carte de la moyenne multi annuelle (2004-2010) de l'irradiation directe en incidence normale (DNI) annuelle exprimée en kWh/m ²).	31
Figure 12 :	Représentation graphique des erreurs d'estimations du GHI mensuel de HelioClim-3 sans étalonnage ni prise en compte de l'orographie. Les disques rouges représentent le biais MBE par station, respectivement positif ou négatif. Les disques verts représentent le RMSE par station. Les croix noires représentent les stations de Météo France non utilisées lors de la comparaison, exclues lors du contrôle de qualité.	32
Figure 13 :	Représentation graphique des erreurs d'estimations du GHI de HelioClim-3 après étalonnage et prise en compte de l'orographie, avec le même code de couleur et les mêmes échelles pour les disques que la figure 12.	33
Figure 14 :	Schéma de fonctionnement de la méthode Heliosat-4 présentant l'articulation entre ses deux modèles principaux : McClear et McCloud.	36
Figure 15 :	Illustration de la précision de l'algorithme rapide de calcul de position du Soleil SG2 par rapport à l'algorithme de référence SPA. Les algorithmes SG, MICH et ENEA sont des algorithmes rapides de calcul de la position du Soleil issus de la bibliographie (voir texte). Cette figure est extraite de Blanc et Wald (2012).	37
Figure 16 :	Exemple de carte globale d'épaisseur optique (sans unité) des aérosols à 550 nm estimée par MACC (modèle MACC-IFS-NRT) le mercredi 10 juin à 3 h UT (www.copernicus-atmosphere.eu/d/services/gac/nrt/nrt_opticaldepth).	39
Figure 17 :	Estimation sur les sites AERONET des biais d'estimation du DNI par McClear induits par les erreurs de MACC sur les épaisseurs optiques des aérosols à 550 nm et 1240 nm.....	40
Figure 18 :	Exemple de cartes du paramètre f_{iso} correspondant à la composante isotrope de la réflectance bidirectionnelle pour le mois de juillet (à gauche) et le mois de décembre (à droite).	41
Figure 19 :	Boîtes à moustaches (MIN, P25, MED, P75, MAX) mensuelles et annuelles des séries multi-annuelles (2004-2010) des éclaircissements en moyenne mensuelle et annuelle par ciel clair GHI, DHI et DNI (McCclear).....	44
Figure 20 :	Boîtes à moustaches (MIN, P25, MED, P75, MAX) mensuelles de la série des moyennes journalières d'éclairement par ciel clair DNI (McCclear).	45
Figure 21 :	Interface pour des requêtes de McCclear sur le site www.soda-pro.com	49

Figure 22 :	Exemple d'un RSI (a) de la société CSP Service et d'un SPN1 (b) de la société Delta-T Devices Ltd. (c) Ensemble des instruments de mesures alternatifs testés lors de la campagne d'inter-comparaison menée sur le site BSRN de MétéoSwiss.	51
Figure 23 :	Exemple de diagramme cible présentant les résultats d'inter-comparaisons pour l'éclairement direct en incidence normale (IRR et IRR_r1 : RSI de la société américaine <i>Irradiance Inc.</i> , RSI et RSI_r1 : RSI de la société allemande <i>Reichert GmbH</i> , RSP et RSP_r1 : RSI de la société allemande <i>CSP Services GmbH</i> , DELTA, DELTA_r1, DELTA_r2 : SPN1 de la société anglaise <i>Delta-T Devices Ltd</i>).	52
Figure 24 :	(a) Exemple de damier utilisé pour l'étalonnage intrinsèque de la caméra. (b) Exemple de superposition de la position théorique (en rouge) et détectée (en bleu) du centre du Soleil lors de l'étalonnage extrinsèque. (c) Exemple d'une image hémisphérique du ciel. (d) Résultat de la classification des pixels de l'image (c) : en bleu les pixels de ciel clair, en magenta les pixels de nuages sombres, en cyan les pixels de nuages clairs et en jaune les pixels non occultés de la zone circumsolaire (les pixels non occultés du disque solaire ne sont pas détectés dans l'exemple).	54
Figure 25 :	Exemple de deux images concomitantes (a, b) provenant de deux caméras hémisphériques distantes de 600 m sur le site de mesure de EDF R&D / CERECA dans le Nord-Est de l'île de la Réunion.	56
Figure 26 :	Schéma de principe du filtrage de Kalman pour l'estimation de la position 3D des nuages.	58
Figure 27 :	Illustration des résultats d'analyse d'opportunité d'une installation solaire photovoltaïque pour alimenter un remonte-pente mécanique pour la station de ski de Valberg (06). (a) Evaluation du masque d'ombrage avec SRTM-v4. (b) Evaluation en moyenne sur la période 2005-2014 du gisement solaire et photovoltaïque pour trois inclinaisons des panneaux. (c) Cartographie de l'éclairement global sur plan horizontal extraite de l'atlas solaire PACA autour de la zone d'intérêt.	66
Figure 28 :	Exemple de restitution à 1 nm de la distribution spectrale de l'éclairement global horizontal par ciel clair (magenta) à partir de la distribution spectrale établie sur 32 bandes spectrales par l'approche de Kato <i>et al.</i> (1999). La courbe bleue correspond à la distribution spectrale de référence.	68
Figure 29 :	Histogramme à deux dimensions mettant en relation l'indice de clarté du ciel (SC) et le ratio circumsolaire (CSR) calculé par libRadtran pour un demi-angle d'ouverture de 4,6°. En trait noir est représenté le modèle empirique proposé permettant d'estimer le CSR pour un indice de clarté du ciel SC donné.	69
Figure 30 :	Représentation des résolutions spatiales et temporelles (a) et des définitions spectrales (b) des anciens, nouveaux et futurs satellites météorologiques géostationnaires dans le monde.	71
Figure 31 :	Localisation des stations pyranométriques (en rouge) et des caméras hémisphériques (en bleu) sur le site de recherche commun au CIEMAT et au DLR, près d'Almeria (Espagne).	73
Figure 32 :	Exemple de représentation sur une image hémisphérique du ciel des altitudes de portions de nuages estimées entre 1000 m et 10000 m par des techniques de photogrammétrie stéréoscopique appliquées sur un couple d'images issues de caméras hémisphériques du site d'Almería.	74
Figure 33 :	Capture d'écran de l'entête Google Scholar (à la date du 27 août 2015).	87
Tableau 1 :	Résultats des analyses statistiques des erreurs d'estimation du GHI de HelioClim-3 sans étalonnage ni prise en compte de l'orographie par comparaison avec les mesures <i>in-situ</i> des 20 stations de Météo France.	31
Tableau 2 :	Résultats des analyses statistiques des erreurs d'estimation du GHI de HelioClim-3 avec étalonnage et prise en compte de l'orographie par comparaison avec les mesures <i>in-situ</i> des 20 stations de Météo France et des trois stations RSI.	33
Tableau 3 :	Vérification de cohérence des altitudes estimées de trois types de nuages (cirrus, altocumulus et cumulus) par comparaison avec leurs gammes d'altitude typique.	57
Tableau 4 :	Liste de base de données et de services sur le rayonnement solaire disséminés par des services au standard OGC (WMS, WPS).	63

LISTE DES ACRONYMES

ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AERONET	<i>AErosol RObotic NETwork</i>
AFGL	<i>Air Force Geophysics Laboratory</i>
AIE	Agence Internationale de l'Energie
AOD	<i>Aerosol Optical Depth</i>
APOLLO	<i>AVHRR Processing scheme Over cLOUDs, Land and Ocean</i>
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BoM	<i>Bureau of Meteorology (Australia)</i>
BSRN	<i>Baseline Surface Radiation Network</i>
CC	<i>Correlation Coefficient</i>
CEP	Centre Energétique et Procédés
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
COST	<i>COoperation in Science and Technology</i>
CPV	<i>Concentrated PhotoVoltaic</i>
CSR	<i>CircumSolar Ratio</i>
CST	<i>Concentrated Solar Technologies</i>
CSTE	<i>Concentrated Solar Thermal Electricity</i>
CSW	<i>Catalogue Services for the Web</i>
DGA	Délégation Générale pour l'Armement
DHI	<i>Diffuse Horizontal Irradiation/Irradiance</i>
DISORT	<i>Discrete Ordinates Radiative Transfer</i>
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (German Aerospace)</i>
DNI	Direct Normal Irradiation/Irradiance
DREAL	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DU	<i>Dobson Unit</i>
EEATS	ED n°220 - Electronique, Electrotechnique, Automatique, Traitement du Signal
ESA	<i>European Space Agency</i>
ESMAP	<i>Energy Sector Management Assistance Program</i>
ESRA	<i>European Solar Radiation Atlas</i>
EUREC	<i>Association of European Renewable Energy Research Centers</i>
FCI	<i>Flexible Combined Imager</i>
FP7	<i>Seventh Framework Programme (2007-2013)</i>
GAW	<i>Global Atmospheric Watch</i>
GEOSS	<i>Global Earth Observation System of Systems</i>
GHI	<i>Global Horizontal Irradiation/Irradiance</i>
H2020	Horizon 2020
IDMP	<i>International Daylight Measurement Programme</i>
IDS	Infrastructure de Données Spatiales
ISES	<i>International Solar Energy Society</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LOOCV	<i>Leave-One-Out Cross-Validation</i>
MACC	<i>Monitoring Atmospheric Composition & Climate</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MBE	<i>Mean Bias Error</i>
MENA	<i>Middle East and North Africa</i>
MLB	<i>Modified Lambert-Beer</i>
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MREF	<i>Mean of Reference</i>
MSG	<i>Meteosat Second Generation</i>
MTG	<i>Meteosat Third Generation</i>

NDATA	<i>Number of DATA</i>
O.I.E.	<i>Observation, Impacts, Energie</i>
OCA.....	<i>Optimal Cloud Analysis</i>
OGC	<i>Open Geospatial Consortium</i>
OMM.....	<i>Organisation Météorologique Mondiale</i>
OPAC	<i>Optical Properties of Aerosols and Clouds</i>
ORECA.....	<i>Observatoire Régionale de l'Energie, du Climat et de l'Air de PACA</i>
PACA.....	<i>Provence-Alpes-Côte d'Azur</i>
PAR	<i>Photosynthetically Active Radiation</i>
PESTO	<i>Programme d'Enseignement Scientifique et Technique d'Ouverture</i>
PIRATA.....	<i>Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic</i>
PNRPA	<i>Parc Naturel Régional des Préalpes d'Azur</i>
POCS	<i>Projection On Convex Sets</i>
PV	<i>PhotoVoltaïque</i>
REST	<i>Master Renewable Energy Science & Technologies</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RSI	<i>Rotating Shadowband Irradiometer</i>
SC	<i>Sky Clearness Index</i>
SEVIRI.....	<i>Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager</i>
SG2	<i>Solar Geometry 2</i>
SHC	<i>Solar Heating & Cooling</i>
SHC-46.....	<i>Tâche 46 du programme SHC de l'AIE</i>
SIG	<i>Système d'Information Géographique</i>
SMI	<i>ED n°432 - Science des Métiers de l'Ingénieur</i>
SolarPACES	<i>Solar Power And Chemical Energy Systems</i>
SOS.....	<i>Sensor Observation Service</i>
SPA	<i>Solar Position Algorithm</i>
SPN1	<i>Sunshine PyraNometer 1</i>
SRCAE	<i>Schéma Régionaux Climats Air Energie</i>
SRRA.....	<i>Solar Radiation Resource Assessment</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
STIC	<i>ED n°84 - Sciences & Technologies de l'Information et de la Communication</i>
SZA.....	<i>Solar Zenithal Angle</i>
TSI.....	<i>Total Sky Imager</i>
UV	<i>Ultraviolet</i>
UVED.....	<i>Université Virtuelle Environnement et Développement durable</i>
WCS.....	<i>Web Covering Service</i>
WIRE	<i>Weather Intelligence for Renewable Energy</i>
WMS.....	<i>Web Map Service</i>
WPS	<i>Web Processing Service</i>
WRDC	<i>World Radiation Data Center</i>

INTRODUCTION

Après huit ans dans le groupe Recherche et Développement de la société *Alcatel Alenia Space* puis *Thales Alenia Space*, j'ai rejoint, en octobre 2007, le centre Energétique et Procédés (CEP), centre de recherche commun de MINES ParisTech et d'ARMINES, à Sophia Antipolis. En 2013, le groupe de recherche du CEP dans lequel je travaillais est devenu un centre à part entière, le centre Observation, Impacts, Energie (O.I.E.)¹.

L'objet scientifique du centre O.I.E. traite des aspects temporels et spatiaux des ressources en énergies renouvelables, de leur influence sur les systèmes de production d'énergie et des impacts environnementaux de la production ainsi que des usages de l'énergie, au travers de l'analyse de cycle de vie. Le centre développe des méthodes pour représenter mathématiquement cette réalité temporelle et géographique, au moyen notamment de l'observation de la Terre et de la modélisation.

La continuité entre mes deux périodes de chercheur avant et après 2007 ne se trouve pas dans les aspects thématiques : hier le renseignement satellitaire et la haute résolution optique spatio-portée, aujourd'hui les énergies renouvelables. Le lien réside plutôt dans la nature des données exploitées issues essentiellement de satellites d'observation optique et des moyens d'analyse nécessitant les mêmes techniques et compétences : le traitement de l'image et du signal, la théorie de l'estimation et de la détection ou, plus généralement, les mathématiques appliquées et l'algorithmique.

L'objet scientifique du centre O.I.E. se situe au carrefour de l'énergie, de l'environnement et de l'observation de la Terre en s'appuyant sur la complémentarité des compétences de ses chercheurs, ingénieurs et doctorants : météorologie, observation de la Terre, mathématiques appliquées, métrologie, sciences de l'information et environnement.

Les travaux du centre contribuent ainsi à deux axes :

- le développement de la météorologie spécifique à l'énergie pour l'évaluation et la prédiction des ressources énergétiques renouvelables (solaire, éolien, marine),
- l'analyse et l'aide à la décision en termes de réduction des impacts environnementaux des transports, de la production et des usages de l'énergie.

Mes activités de recherche au sein du centre O.I.E concernent plus particulièrement l'analyse de la ressource solaire, au moyen de données d'observation de la Terre. Le terme d'observation de la Terre est défini au sens du GEOSS² (*Global Earth Observation System of Systems*), c'est-à-dire comprenant les données acquises par les satellites, mais aussi les modèles numériques (modèles météorologiques et modèles de chimie-transport) ou encore les mesures *in-situ*.

Je suis actuellement en charge des activités de recherche sur la ressource en énergies renouvelables. Outre la réalisation de tâches de recherche en lien avec des projets en cours, cette responsabilité correspond :

- à l'animation scientifique d'un groupe d'une dizaine de personnes environ, composé de chercheurs, d'ingénieurs de recherche, doctorants et étudiants ;
- au montage de nouveaux projets scientifiques dans l'esprit du programme de recherche du centre ;
- au suivi et à la mise à jour collective du programme de recherche du centre.

¹ www.oie.mines-paristech.fr

² www.earthobservations.org/geoss.php : il s'agit d'une initiative internationale englobant la gamme entière des observations effectuées *in-situ* et par télédétection (depuis l'espace et au moyen d'aéronefs) et visant notamment à accroître l'interopérabilité et l'inter-connectivité des différents systèmes d'observation constituants, de manière à faciliter l'échange et la mise en commun des données et informations selon des normes établies d'un commun accord.

L'objet de ce document est de proposer une synthèse ainsi que les perspectives de mes activités de recherche depuis 2007 à MINES ParisTech. Cette recherche est bien sûr le fruit d'un travail collectif mené par l'équipe dont j'ai actuellement la responsabilité. Mon apport scientifique dans ce groupe réside essentiellement dans l'aide à la formalisation mathématique des problèmes et à leurs résolutions au moyen d'algorithmes mettant en œuvre le traitement d'image, du signal, l'analyse statistique ou, de manière générale, les mathématiques appliquées. J'y apporte également mes connaissances dans la mesure du rayonnement par des instruments de mesures in-situ acquises ces dernières années.

Le chapitre I est une synthèse de mes travaux de recherche. Dans ce document, j'ai fait le choix ne pas m'étendre sur mes activités de recherche effectuées de 2000 à 2007 dans le département R&D d'*Alcatel Space Industries* devenue ensuite *Thales Alenia Space*. Ces activités sont très brièvement résumées dans la section I-1. La section I-2 de ce chapitre est consacrée à la description de mes activités de recherche actuelles, depuis 2007 au sein de MINES ParisTech.

Le chapitre II propose une synthèse des actions de dissémination et des impacts sociétaux de ma recherche.

Le chapitre III est consacré aux perspectives de recherche à moyen et long terme.

Enfin, le chapitre IV est un *curriculum vitae* proposant :

- mon cursus depuis l'obtention de mon diplôme d'ingénieur en 1995 ;
- une liste exhaustive de mes publications scientifiques depuis 1996 ;
- une liste de mes travaux de recherche en tant qu'enseignant-chercheur à MINES ParisTech depuis 2007 ;
- une description de mon rayonnement et actions scientifiques sur les plans nationaux et internationaux ;
- une liste précisant mes participations à des encadrements de thèses et mes encadrements de stages de fin d'études de niveau Master II ainsi que mes activités d'enseignement.

CHAPITRE I - SYNTHÈSE DES TRAVAUX SCIENTIFIQUES

1. ACTIVITÉS DE RECHERCHE PASSÉES DANS L'INDUSTRIE

En avril 2000, j'ai intégré le département R&D de la société *Alcatel Space Industries* devenue ensuite *Thales Alenia Space*. Mes travaux de recherche ont concerné les systèmes spatiaux optiques pour l'observation de la Terre à haute résolution spatiale (*i.e.* métrique et sub-métrique). J'ai participé à des études pour la simulation, le dimensionnement et l'optimisation bord/sol des futurs systèmes d'observation haute-résolution pour des missions civiles et militaires.

J'ai notamment travaillé sur des études de R&D portant sur l'utilisation de l'interférométrie optique pour l'observation métrique de la Terre depuis l'orbite géostationnaire. Ces études ont donné lieu à des publications – essentiellement des communications dans des congrès internationaux avec actes – et aux dépôts de huit brevets (*cf.* la section IV-2.5).

J'ai aussi mené des études sur l'analyse de la qualité image, l'exploitation et la restauration des images avec des techniques de déconvolution, de débruitage, de correction géométrique ou encore de photogrammétrie. L'ensemble de ces projets a été le plus souvent réalisé en étroite collaboration avec des laboratoires de recherches comme ceux de l'INRIA, de l'ENS Cachan, de Polytechnique ou encore de MINES ParisTech.

En 2005, mon expertise a été reconnue au sein de l'entreprise par une commission, avec mon admission comme membre de l'*Alcatel-Lucent Technical Academy* (voir section IV-4.6). J'ai été régulièrement consulté en tant qu'expert interne par le groupe Alcatel puis Thales ou externe pour le CNES, la DGA ou encore l'ESA sur des projets mettant en jeu des techniques avancées de traitement d'images et de signal, d'estimation statistiques, d'algorithmique et de mathématiques appliquées.

2. ACTIVITÉS DE RECHERCHE ACTUELLES

Ainsi qu'énoncées en introduction, mes activités de recherche au sein de MINES ParisTech concernent essentiellement l'analyse de la ressource solaire, au moyen de données d'observation de la Terre afin de modéliser le plus finement possible la variabilité spatiale et temporelle des descripteurs relatifs à l'éclairement solaire incident au sol.

L'éclairement solaire incident au sol est une mesure relative au rayonnement solaire sur la Terre. Il est défini comme le flux énergétique par unité de surface issu du rayonnement solaire incident, exprimé en W/m^2 . Nous traitons ici de l'éclairement total, c'est-à-dire intégré sur l'ensemble du spectre solaire – typiquement entre 290 nm et 3 μm –, reçu sur un plan horizontal, sauf mention contraire. En 2010, l'éclairement solaire incident au sol a été identifié par le système mondial d'observation du climat de l'Organisation Météorologique Mondiale³ (OMM) comme une variable climatique essentielle⁴ pour comprendre et suivre le système climatique global. En plus de son intérêt dans le domaine de la climatologie, l'éclairement solaire incident au sol est aussi de première importance pour des domaines aussi variés que l'énergie solaire, la santé, l'architecture, l'agriculture ou encore la foresterie.

La recherche du centre O.I.E. sur la ressource solaire est applicable à ces différents domaines, mais elle est tout de même essentiellement tournée vers des applications relatives à l'énergie solaire. Par analogie avec d'autres sources d'énergie, l'éclairement solaire peut en effet être considéré comme un gisement ou une ressource.

³ www.wmo.int/pages/index_fr.html

⁴ www.wmo.int/pages/prog/gcos/index.php?name=EssentialClimateVariables

Plusieurs voies de conversion énergétique sont possibles pour l'exploiter :

- la conversion directe en énergie électrique par cellule photovoltaïque ;
- la conversion directe en énergie thermique par capteur solaire thermique, par exemple, pour la production d'eau chaude sanitaire ;
- la conversion thermodynamique en énergie électrique associant capteur solaire thermique, turbine ou moteur thermique et générateur électrique ;
- la conversion en énergie chimique par voie photochimique avec la production d'hydrogène par photolyse de l'eau.

2.1 Evaluation de la ressource solaire et quelques verrous scientifiques

La ressource solaire peut être évaluée au moyen de capteurs pyranométriques disposés au sol. Ces capteurs permettent une caractérisation précise du rayonnement solaire pour un lieu donné avec une résolution temporelle de l'ordre de la minute, voire moins dans certains cas.

Ces capteurs pyranométriques sont, par exemple :

- des pyréliomètres pour la mesure de l'éclairement solaire direct en incidence normale, c'est-à-dire le flux solaire en provenance de la direction du Soleil ;
- des pyranomètres avec un système d'ombrage pour la mesure de l'éclairement solaire diffus incident au sol, c'est-à-dire l'éclairement provenant de toute la voûte céleste sauf la direction du Soleil ;
- des pyranomètres pour la mesure de l'éclairement solaire global incident au sol, c'est-à-dire la somme des éclairements directs et diffus.

D'autres instruments pyranométriques existent comme le *Rotating Shadowband Irradiometer* (RSI) ou encore le SPN1 (*Sunshine Pyranometer 1*) (Wood, 1999 ; Wood, 2007) et seront décrits plus en avant dans ce document. Nous discuterons également d'un « nouvel » instrument météorologique *in-situ* composé de caméras avec des objectifs à très grand angle produisant des séries temporelles d'images hémisphériques du ciel.

Ces moyens de mesures *in-situ* sont globalement très rares. Outre leur prix d'achat et d'installation, ils nécessitent une maintenance régulière, ne serait-ce qu'un nettoyage. A l'échelle du globe, de nombreuses zones, notamment en Afrique, ne disposent d'aucun capteur pyranométrique. Pour un lieu dépourvu de capteurs, des interpolations et extrapolations des mesures enregistrées par des stations proches sont *a priori* envisageables. Cependant, la précision de telles estimations diminue fortement avec la distance aux stations et la précision atteinte peut ne pas être satisfaisante (Perez *et al.*, 1997 ; Zelenka *et al.*, 1999).

Les stations pyranométriques sont d'ailleurs d'autant plus rares qu'elles sont composées d'instruments supplémentaires au « simple » pyranomètre avec, par exemple et par ordre croissant de rareté, des pyranomètres ombrés, des pyréliomètres avec système de suivi du Soleil ou encore des instruments permettant des mesures spectrales du rayonnement pour les différentes composantes. Ainsi, le réseau de stations météorologiques de Météo France comprend-il en France métropolitaine un peu plus de 450 pyranomètres mais un seul pyréliomètre en fonction, à Carpentras, dans le Sud de la France.

De plus, les périodes temporelles de mesures de ces stations sont très fragmentées et les stations de mesures *in-situ* offrant réellement de longues séries de mesures – supérieures à vingt ans par exemple – sont très peu répandues.

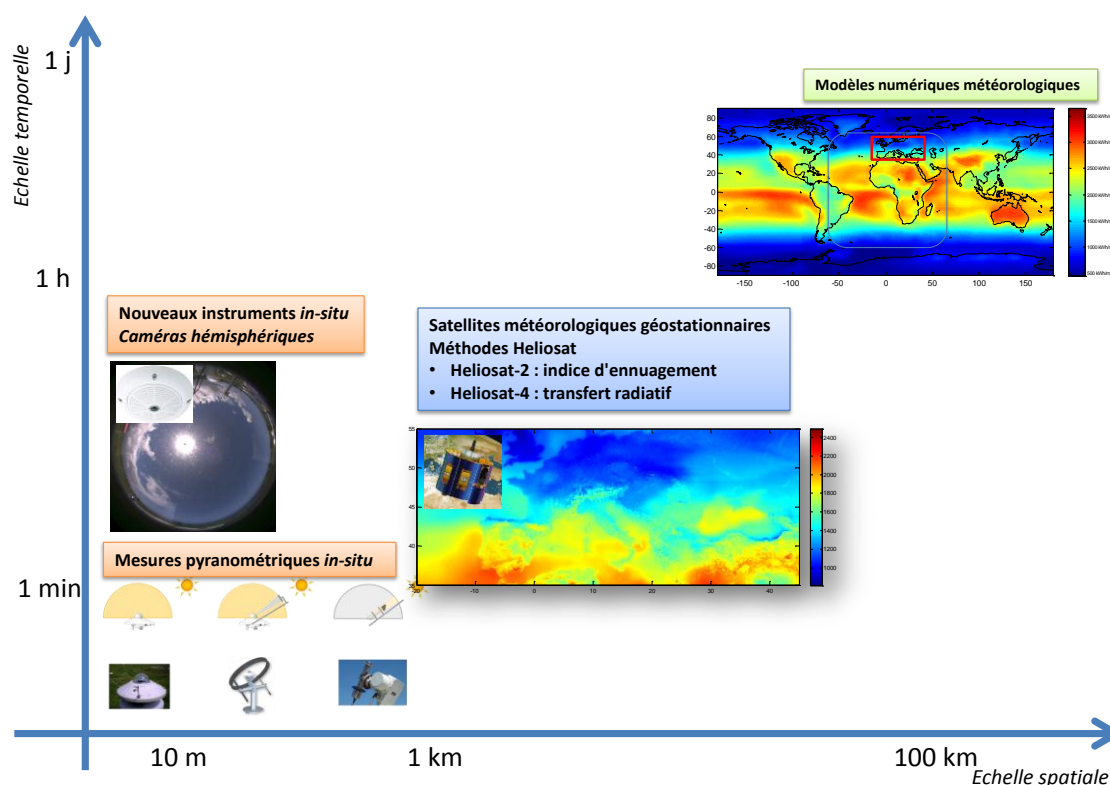


Figure 1 : Représentation schématique des échelles spatiales et temporelles accessibles par différents moyens de caractérisation de la ressource solaire.

Comme le montre de manière très schématique la figure 1, à l'opposé des mesures *in-situ* permettant une caractérisation temporelle très précise mais spatialement ponctuelle du rayonnement solaire, les modèles météorologiques numériques permettent la caractérisation du rayonnement solaire de manière globale mais à des échelles temporelles de plusieurs heures et des échelles spatiales de l'ordre de la centaine de kilomètres. De nombreuses recherches sont actuellement menées pour améliorer la précision des estimations et la finesse des échelles spatiales et temporelles de caractérisation et de prévision. Ces recherches visent notamment à lever les verrous relatifs à l'assimilation des mesures pyranométriques *in-situ* et à la représentation dynamique du couvert nuageux. Bien que parfois utilisés et analysés, ces modèles numériques météorologiques sortent du cadre de mes activités de recherche et ne seront pas décrits plus en détail dans ce document.

Afin de répondre à l'objectif d'une caractérisation fine des échelles spatiales et temporelles de la variabilité de la ressource solaire, une approche alternative et complémentaire aux mesures *in-situ* réside dans l'utilisation d'images des satellites météorologiques en orbite géostationnaire. En effet, ces satellites météorologiques comme ceux de la famille Meteosat produisent des images sur lesquelles on distingue bien les nuages avec une résolution spatiale de quelques kilomètres et une résolution temporelle sub-horaire (cf. figure 1). Ces nuages sont, dans le domaine spectral visible, généralement plus réfléchissants que les sols qu'ils recouvrent. L'occurrence d'un nuage se traduit, dans ces longueurs d'ondes, par une augmentation du signal perçu par le satellite par rapport à ce que ce même satellite devrait percevoir si le ciel était clair. Cette augmentation peut être liée à l'atténuation du rayonnement solaire depuis le sommet de l'atmosphère jusqu'au sol. Ce principe simple, de nature indirecte, a été adopté par de nombreuses méthodes pour l'estimation du rayonnement solaire incident au sol.

Parmi ces méthodes, la première version de la méthode Heliosat a été proposée par MINES ParisTech en 1980, en collaboration avec Mr. Perrin de Brichambaut de Météo-France (Cano *et al.*, 1986 ; Diabate *et al.*, 1988). Elle détermine un « indice d'enneuagement » à partir des images dans la bande spectrale visible. Cet indice, couplé à un modèle d'éclairement par ciel clair exogène, permet une estimation de l'éclairement solaire incident au sol. La méthode Heliosat est sans doute la plus connue et la plus adoptée et adaptée par d'autres laboratoires de recherche (Beyer *et al.*, 1996 ; Perez *et al.*, 2002, Hammer *et al.*, 2003 ; Dür and Zelenka, 2009 ; Marie-Joseph *et al.*, 2013). On trouve par exemple, plus de 990 citations, source Web of Sciences⁵ à Heliosat.

Actuellement, à MINES ParisTech, la méthode dans sa deuxième version, Heliosat-2 (Rigollier *et al.*, 2004), est appliquée au satellite météorologique géostationnaire *Meteosat Second Generation* (MSG) et permet d'enrichir en quasi-temps réel une base de données d'éclairement solaire incident au sol, nommée HelioClim-3, couvrant l'Afrique, l'Europe, le Moyen-Orient et l'Océan Atlantique depuis 2004 avec des résolutions spatiales et temporelles correspondant à celles du système spatial c'est-à-dire 3 km et 15 min (Blanc *et al.* 2011a). Elle coexiste avec d'autres bases, comme par exemple SolarGIS⁶, 3Tier⁷, SOLEMI⁸, Satel-Light⁹, CM SAF MVIRI¹⁰, CM SAF CLAAS¹¹, CM SAF SARAH¹², LSA SAF DSSF¹³ ou encore EnMetSol¹⁴. La base de données HelioClim-3 est considérée comme une base de données de référence par les professionnels qui ont effectué près de 4 millions de requêtes en 2013¹⁵.

On peut cependant constater un certain nombre de problèmes ou limitations dans la méthode Heliosat-2, et de manière plus générale, dans les approches de type « indice d'enneuagement », qui sont autant de verrous scientifiques à lever pour améliorer nos connaissances sur l'éclairement solaire incident au sol.

▪ **Verrou A : la limitation en résolution spatiale et temporelle des estimations du rayonnement solaire par imagerie satellitale**

Les estimations des éclairissements solaires par satellite sont contraintes par les résolutions et les supports d'échantillonnages spatiaux et temporels de l'instrument spatio-porté dont les images sont issues. Ainsi, la base de données HelioClim-3 est-elle « assujettie » aux résolutions de l'instrument SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*) embarqué dans MSG. Compte tenu de la tache image de l'instrument optique et de la taille des détecteurs, l'échantillonnage spatial de la luminance tous les 3 km au nadir intègre les effets pondérés de l'environnement sur une empreinte – ou support – de plus de 10 km. En revanche, l'échantillonnage temporel pour un pixel est quasi-instantané – de l'ordre de la dizaine de μ s – devant les 15 min qui séparent deux acquisitions consécutives de ce pixel.

A l'inverse, un instrument pyranométrique mesure des éclairissements incidents au sol de manière ponctuelle spatialement mais de manière intégrée temporellement : une série temporelle de mesures d'éclairement selon un pas de 15 min correspond, sauf exception, à la moyenne de cet éclairissement durant les 15 min précédant l'instant d'échantillonnage.

⁵ apps.webofknowledge.com

⁶ geomodelsolar.eu/solargis

⁷ www.3tier.com

⁸ www.dlr.de/tt/en/desktopdefault.aspx/tabid-2885/4422_read-6581/

⁹ www.satel-light.com

¹⁰ wui.cmsaf.eu/safira/action/viewDoiDetails?acronym=RAD_MVIRI_V001

¹¹ wui.cmsaf.eu/safira/action/viewDoiDetails?acronym=CLAAS_V001

¹² wui.cmsaf.eu/safira/action/viewDoiDetails?acronym=SARAH_V001

¹³ landsaf.meteo.pt/algorithms.jsp?selftab=1

¹⁴ www.uni-oldenburg.de/en/physics/research/ehf/energiemeteorology/enmetsol/

¹⁵ Source : sites web www.soda-is.com et www.soda-pro.com

Se pose alors la question de la représentativité de l'estimation par satellite vis-à-vis du champ spatial et temporel d'éclairement incident au sol, compte tenu de sa variabilité. Peut-on compter sur l'ergodicité de ce champ ? Le cas échéant, dans quelle proportion et à quelles échelles spatiales et temporelles ?

A titre d'exemple, nous avons comparé une série temporelle d'éclairement global issue de HelioClim-3 avec des mesures *in-situ* d'éclairement global sur quatre mois issues d'un réseau très dense de 99 pyranomètres. Ce réseau a été installé dans une zone de 10 km par 10 km près de Jülich en Allemagne par TROPOS, l'institut Leibniz de recherche sur la troposphère, dans le cadre du programme HOPE¹⁶ (Madhavan *et al.*, 2015). Ces comparaisons ont été menées suivant les pas et supports temporels de 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 6 h et 24 h et quatre supports spatiaux de 1 km, 2 km, 4 km et 6 km agrégeant plus ou moins de stations de mesure (cf. figure 2a).

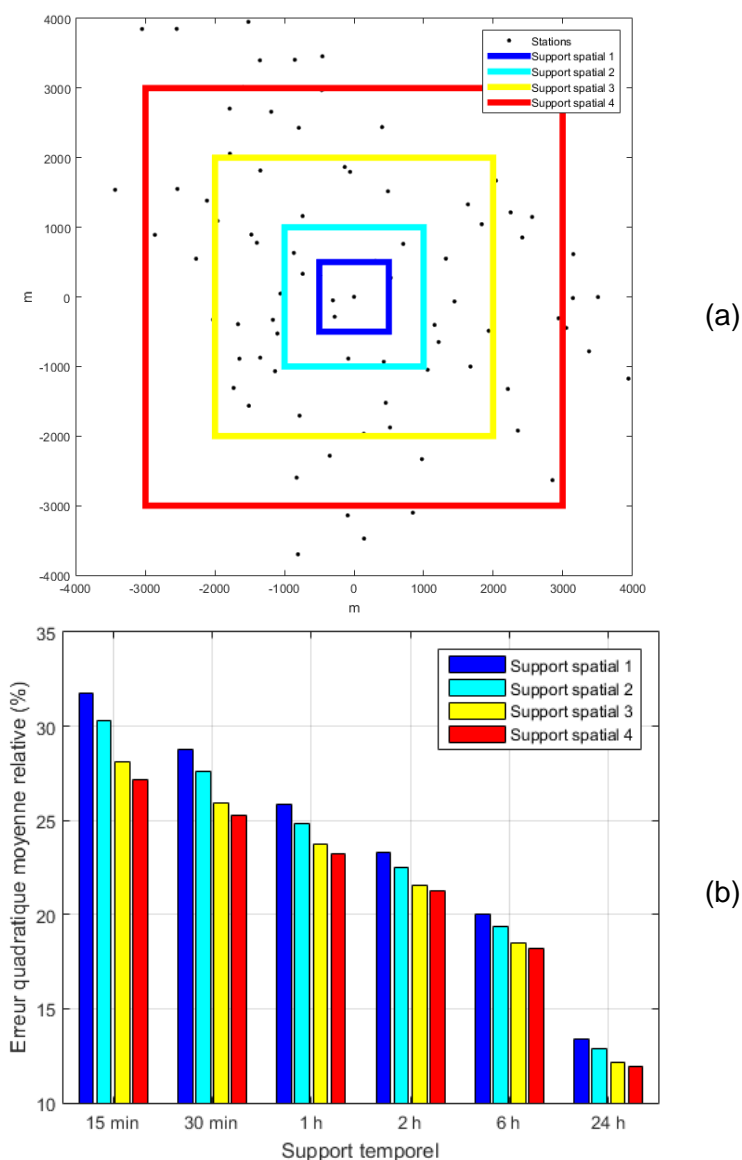


Figure 2 : (a) Représentation des stations de mesures HOPE (points noirs) et des différents supports spatiaux considérés pour la comparaison avec HelioClim-3. (b) Erreur quadratique moyenne relative pour les différents supports spatiaux (1 : 1km, 2 : 2 km, 3 : 4 km et 4 : 6 km) et temporels (15 min, 30 min, 1 h, 2h, 6 h et 24 h).

¹⁶ www.tropos.de/en/research/projects-infrastructures-technology/research-projects/hdcp2/

On constate sur la figure 2b des effets d'ergodicité. Ainsi, par exemple, avec une intégration temporelle de 1 h, observe-t-on une erreur quadratique moyenne plus faible sur le support temporel de 1 km que celle observée à 15 min sur le support spatial de 6 km : une intégration temporelle se traduit ainsi par une amélioration de la représentativité spatiale à plus fine échelle. On peut aussi observer que les agrégations spatiales et temporelles des mesures *in-situ* améliorent sensiblement les erreurs quadratiques moyennes, ce qui signifie que les estimations HelioClim-3 sont proches des valeurs agrégées. Il s'agit cependant d'un cas d'étude qui ne peut pas servir de démonstration. Cette région ne présente pas d'orographie particulière pouvant induire des effets locaux d'ombrage ou de micro-météorologie diminuant la portée des corrélations spatiales et temporelles. Dans le cas contraire, ces effets peuvent très sensiblement dégrader la représentativité des estimations de HelioClim-3, même à des échelles spatiales ou temporelles plus grossières.

Lever le verrou A consiste donc à être à même d'améliorer la résolution spatiale – respectivement temporelle – des estimations par satellite en prenant soin de déterminer les échelles temporelles – respectivement spatiales – auxquelles il y aura un réel gain de représentativité.

Verrou B : les incertitudes inhérentes à la modélisation par indice d'ennuagement de la méthode Heliosat-2

Comparées de manière globale à des mesures pyranométriques *in-situ* de 13 stations pyranométriques du réseau BSRN¹⁷ (*Baseline Surface Radiation Network*) dans le champ de vue de MSG, les estimations de HelioClim-3 présentent des erreurs, toutes stations et saisons confondues, que l'on qualifie d'acceptables : sans correction statistique particulière, le biais global est de moins de 6 % de la moyenne des mesures, soit environ 25 W/m² et l'écart type des erreurs est de moins de 23 % (91 W/m²). Cependant, comme le montre la figure 3, on constate que ces erreurs globales cachent de fortes disparités régionales ou saisonnières avec des biais mensuels sur certaines stations entre -20 % et 30 % et des erreurs quadratiques moyennes entre 5 % et 60 %.

¹⁷ www.bsrn.awi.de

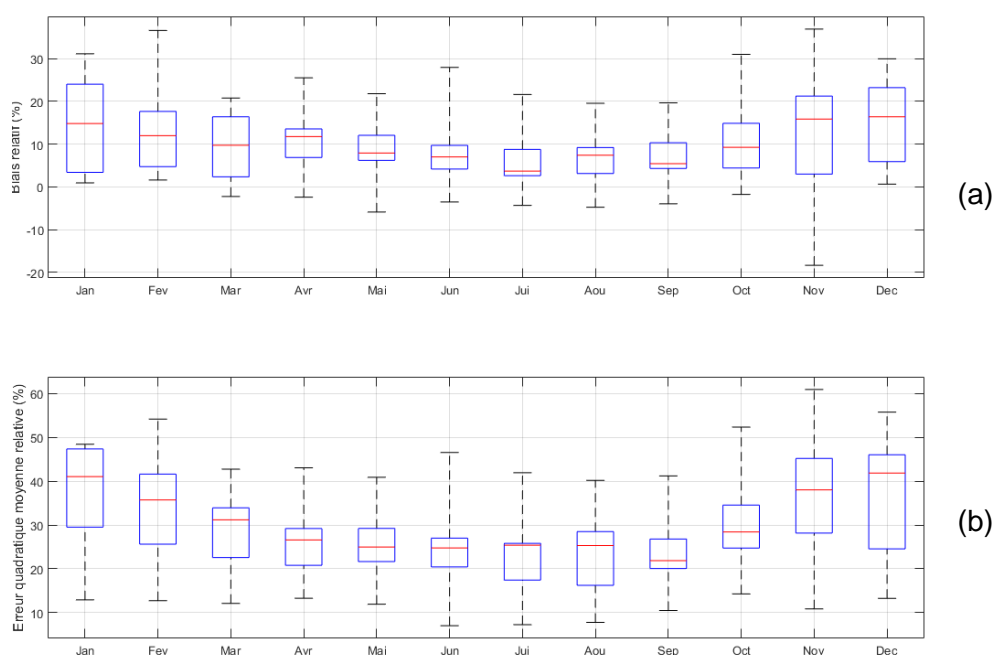


Figure 3 : Diagramme en boîtes à moustache représentant les biais (a) et les erreurs quadratiques moyennes (b) des estimations de l'éclairement moyen sur 15 min de HelioClim-3, calculés mensuellement et exprimés en valeur relative à la moyenne des mesures correspondantes de 13 stations du réseau BSRN (*Baseline Surface Radiation Network*).

On peut avancer plusieurs explications pour cette forte disparité saisonnière et spatiale constatée des erreurs d'estimation de HelioClim-3.

La première explication est relative au premier défi. En effet, une part de ces erreurs est sans doute imputable à la différence des échantillonnages spatiaux et temporels entre les mesures *in-situ* et les images satellites. La variabilité spatio-temporelle sous-jacente de l'éclairement global horizontal qui est perçue différemment par le satellite ou les instruments *in-situ*, n'est pas identique d'une station à l'autre et varie aussi dans le temps : elle explique donc une partie de la dispersion constatée des erreurs d'estimation.

Les erreurs de modélisation de la méthode Heliosat-2 constituent la deuxième part des erreurs d'estimation. Les incertitudes des mesures *in-situ* ne sont pas nulles mais, lorsque des procédures de contrôle de qualité appropriées sont appliquées, elles demeurent relativement négligeables devant celles propres à Heliosat-2.

En premier lieu, la méthode Heliosat-2 s'appuie sur un modèle d'estimation de l'éclairement par ciel clair – *i.e.* sans nuage – exogène : le modèle ESRA (*European Solar Radiation Atlas*, Rigollier *et al.*, 2000), alimenté par une base de données climatologiques de moyennes mensuelles d'indice de trouble de Linke (Remund *et al.*, 2003). Le modèle ESRA a été établi de manière empirique sur la base d'un nombre restreint de stations de mesures pyranométriques. Par ailleurs, les données climatologiques mensuelles de trouble de Linke – indice de turbidité de l'atmosphère – en entrée de ce modèle présentent une incertitude élevée, de l'ordre de 0,8 en erreur quadratique moyenne pour un trouble de Linke variant typiquement entre 1 et 5. Ces données sont issues de la fusion de différentes cartes de trouble de Linke à différentes résolutions spatiales et d'estimations faites à partir de 268 stations *in-situ* réparties de manière inhomogène et dans les faits très peu dense sur la Terre : cette incertitude de 0,8 présente, à n'en pas douter, de fortes dispersions spatiales. C'est la raison pour laquelle on peut considérer que ce modèle est susceptible d'induire un problème de représentativité et de précision de l'éclairement incident au sol par ciel clair.

En deuxième lieu, la méthode Heliosat-2 a recours uniquement à des informations issues des canaux dans le visible de SEVIRI pour déterminer un indice d'ennuage. Ce dernier est alors transformé en indice de ciel clair qui sera *in fine* multiplié par l'éclairement par ciel clair donné par ESRA. Rappelons que l'indice de ciel clair est défini par le rapport de l'éclairement incident au sol avec l'éclairement correspondant par ciel clair.

La figure 4 présente un diagramme de dispersion – ou corrélogramme – entre les indices de ciel clair issus de HelioClim-3 comparés à ceux dérivés de mesures *in-situ* des mêmes 13 stations du réseau BSRN.

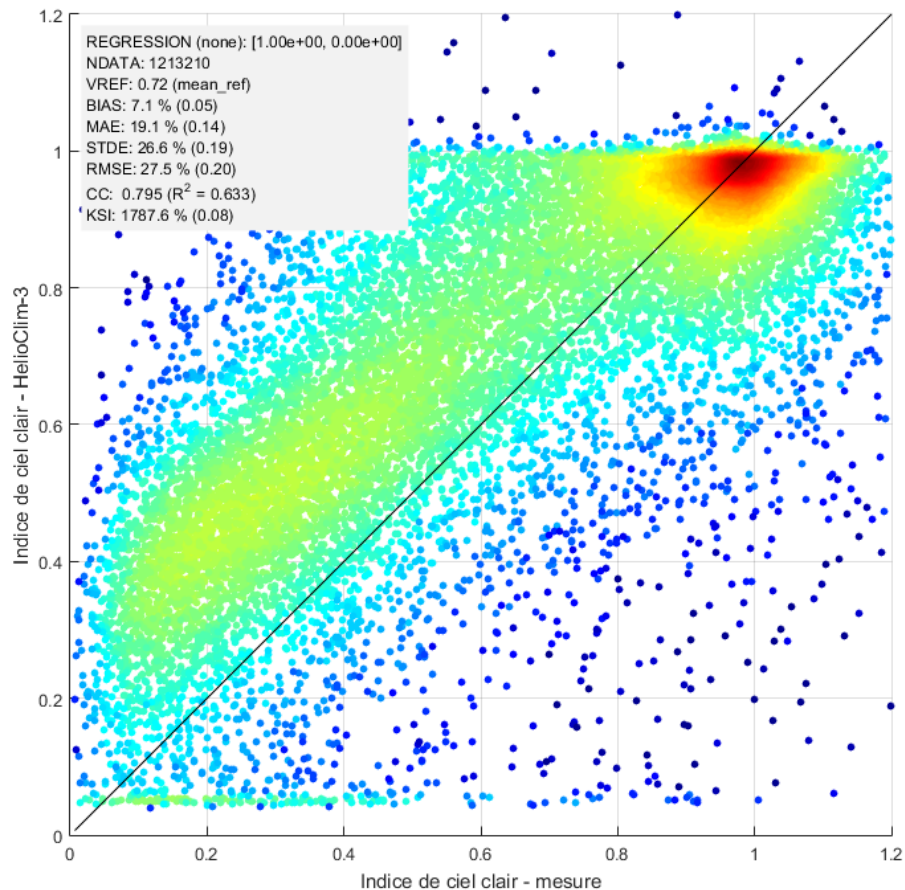


Figure 4 : Diagramme de dispersion entre les indices de clarté issus de HelioClim-3 et ceux dérivés de mesures *in-situ*. La couleur des points correspond à la densité des points en échelle log (du moins dense en bleu au plus dense en rouge).

On observe dans ce diagramme deux modes : les instants de ciel clairs correspondant aux forts indices de clarté, supérieurs à 0,8 et les instants en présence de nuages. Pour les valeurs plus faibles d'indice de ciel clair issu de la mesure, on note une forte dispersion non centrée autour de la première bissectrice. En excluant les fortes valeurs d'indice de ciel clair des mesures, le coefficient de corrélation est inférieur à 0,65 et le biais de surestimation est de l'ordre de +40 %.

On remarque enfin en haut à droite du diagramme de la figure 4 des situations où l'indice de ciel clair de HelioClim-3 est défini à 1 ou plus alors qu'il est, pour la mesure, inférieur à 0,8 : tout indique une non-détection des nuages pour ces instants. A l'inverse, on note une série de situations en bas du diagramme pour lesquelles, manifestement, des nuages ont été faussement détectés par la méthode Heliosat-2. Ces problèmes de détection de nuages peuvent en partie être expliqués par des erreurs de parallaxes : les pixels nuageux du capteur SEVIRI sont attribués à une géolocalisation sur la Terre erronée du fait de la méconnaissance de l'altitude des nuages (cf. figure 5).

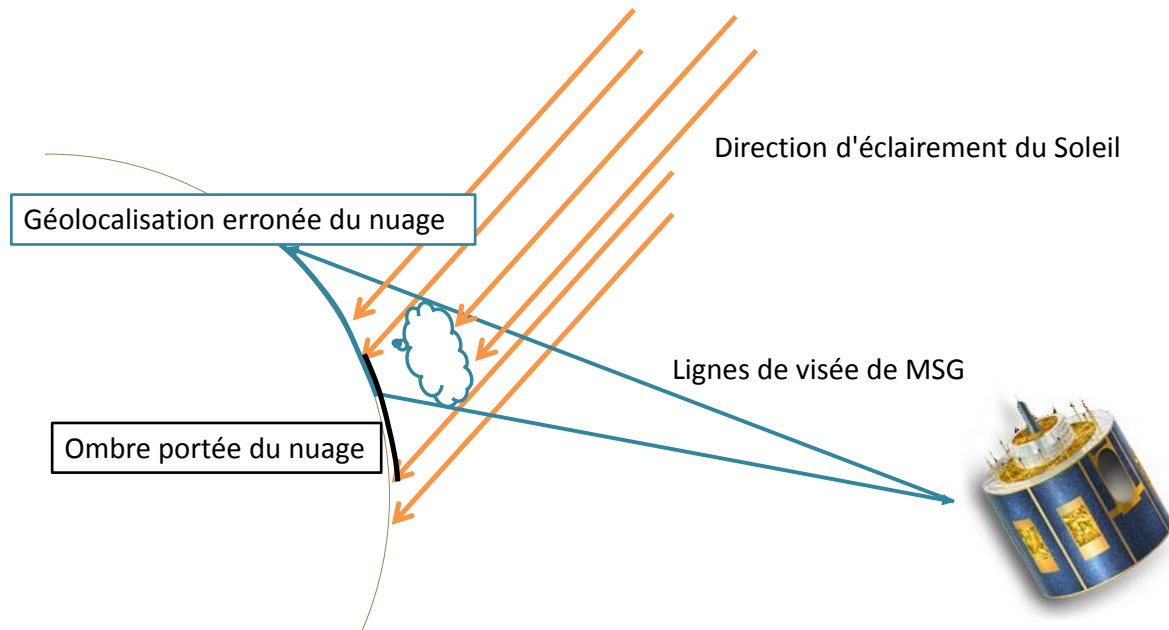


Figure 5 : Schéma simplifié des effets de parallaxes sur la géolocalisation des nuages et sur leurs ombres portées.

Enfin, la méthode Heliosat-2 a recours à une estimation endogène de l'albédo du sol pour estimer l'indice d'ennuagement. Cette estimation est locale et effectuée par analyse des *minima* de la réflectance mesurée sur une fenêtre temporelle glissante. L'estimation de l'éclairement par cette méthode est très sensible aux erreurs d'estimation de l'albédo qui peuvent par exemple, survenir localement sur des sites fortement réflectifs avec des effets non-lambertiens prononcés (Polo *et al.*, 2012 ; Espinar *et al.*, 2009 ; Lefèvre *et al.*, 2007). Les ombres portées des nuages peuvent aussi induire de mauvaises estimations de l'albédo par Heliosat-2, comme le montre schématiquement la figure 5.

En résumé, lever le verrou B consiste à remédier aux incertitudes de la méthode Heliosat-2 afin d'améliorer et d'uniformiser dans le temps et l'espace la précision des estimations des éclaircissements. Ces incertitudes sont liées à :

- la représentativité et la précision de l'éclairement par ciel clair ;
- la prise en compte des effets d'extinction du rayonnement par les nuages ;
- l'estimation endogène de l'albédo du sol ;

Verrou C : la limitation de la caractérisation du rayonnement solaire incident

L'estimation de la ressource solaire nécessite une caractérisation plus détaillée de l'éclairement. Il s'agit ici de fournir les informations nécessaires à la gestion des moyens de conversion de l'énergie solaire envisagés (*i.e.* systèmes photovoltaïques, thermiques, thermodynamiques ou encore photochimiques).

Ainsi, la production électrique par des cellules photovoltaïques sur un plan orienté – fixe ou en mouvement – dépend-elle de l'éclairement global suivant l'orientation de ce dernier. A l'inverse, un système à concentration photovoltaïque ou thermodynamique sera sensible uniquement à l'éclairement direct avec une fraction plus ou moins importante de l'éclairement diffus dans une zone angulaire dite circumsolaire proche de la direction du Soleil, en fonction de l'angle d'acceptance de son système optique de concentration. Par ailleurs, si les systèmes de conversion thermodynamique sont sensibles à toute la bande spectrale large allant de 0.3 μm à 2.5 μm , les systèmes de conversion par photovoltaïque sont, eux, sensibles sur des bandes spectrales plus étroites entre 0,3 μm et 1,1 μm , dépendant de la nature des cellules photovoltaïques.

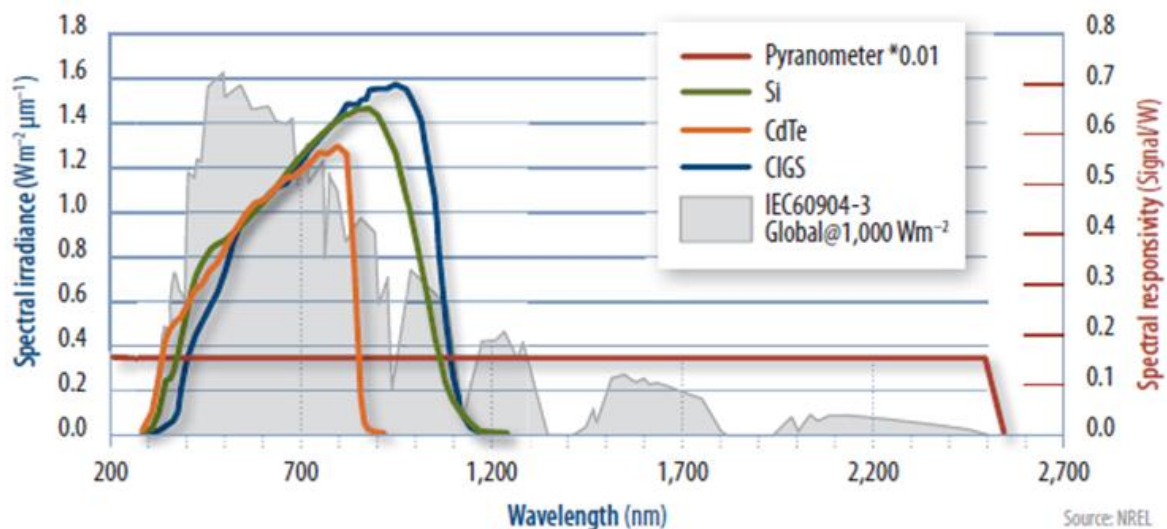


Figure 6 : Sensibilités spectrales typiques de différentes cellules photovoltaïques (source : Meydbray et Emery, 2012).

En conséquence, les caractéristiques de l'éclairement solaire liées à sa répartition spectrale et angulaire – composantes directe, circumsolaire, diffuse, etc. – sont des caractéristiques déterminantes pour la définition de l'adéquation, du mode d'opération et du rendement d'un moyen de conversion solaire, en un lieu donné.

La méthode Heliosat-2, par son approche indirecte de type « indice d'ennuagement », ne donne que l'estimation de l'éclairement global solaire incident au sol sur le plan horizontal. Son approche essentiellement empirique ne fournit pas une connaissance physique de l'état optique de l'atmosphère permettant de dériver des caractéristiques plus détaillées du rayonnement solaire incident au sol.

Cette limitation est pour le moment contournée par l'application, quand cela est possible, de fonctions de transposition empiriques et/ou de régressions statistiques établies sur la base de mesures pyranométriques *in-situ*. Ces fonctions ou régressions utilisent comme variables explicatives des variables observables ou estimées comme l'éclairement global horizontal, l'angle solaire zénithal, la masse d'air corrigée de la pression, les éclairements solaires hors atmosphère totaux ou spectraux, les éclairements par ciel clair modélisé par ESRA, etc. Ces variables explicatives sont alors utilisées pour estimer des variables non observables comme la fraction de diffus – rapport des éclairements diffus et global – ou encore des éclairements solaires sur des bandes spectrales particulières.

Ainsi, la fonction de transposition G2 proposée par Ruiz-Arias *et al.* (2012) est-elle utilisée par la base de données HelioClim-3, déterminant l'éclairement diffus – et donc, par soustraction, l'éclairement direct – à partir de l'estimation de l'indice de clarté et de la connaissance de la masse d'air. Cette fonction analytique de transposition a été établie par régression non linéaire d'une fonction paramétrique particulière sur la base de mesures *in-situ* concomitantes des éclairements globaux et diffus provenant d'une vingtaine de stations pyranométriques essentiellement situées en Europe et en Amérique du Nord, sur des périodes temporelles différentes, pour la plupart avant 1990.

De la même manière, les estimations journalières d'éclairements totaux mesurés dans la bande spectrale solaire de 290 nm à 3 μm issues de HelioClim-3 peuvent être transformées en éclairements sur des bandes spectrales dans le domaine de l'ultraviolet (UV) en ayant recours à la

méthode de décomposition spectrale empirique proposée par Joukoff *et al.* pour l'atlas ESRA (Wald *et al.*, 2000).

Bien qu'utilisées de manière routinière notamment pour la base de données HelioClim-3, ces approches empiriques ne sont cependant pas pleinement satisfaisantes car elles soulèvent des problèmes de précision et de représentativité :

- Précision : les variables explicatives observables utilisées (indice de clarté, masse d'air, etc.) du modèle de régression ne sont pas exhaustives et, pour une même combinaison de ces variables explicatives, plusieurs états optiques de l'atmosphère peuvent correspondre.
- Représentativité : la régression dont sont issues ces fonctions de transposition a été établie sur des jeux restreints de mesures *in-situ* provenant de stations pyranométriques souvent mal réparties géographiquement et temporellement.

Lever le verrou C consiste alors à ne plus recourir à ces fonctions de transposition empiriques, mais à accéder à une caractérisation du rayonnement solaire incident au sol plus exhaustive, plus fine, plus précise et plus représentative.

Verrou D : les difficultés d'utilisation de l'instrumentation *in-situ*

Le dernier verrou concerne l'instrumentation *in-situ* en relation avec le rayonnement solaire. Cette instrumentation comprend notamment les capteurs pyranométriques – pyranomètre, pyranomètre ombré, pyréliomètre – mais aussi les photomètres solaires pour la caractérisation spectrale des aérosols et de la luminance solaire incidente ou encore les caméras hémisphériques filmant le ciel qui font actuellement l'objet d'une activité en pleine expansion.

Cette instrumentation *in-situ* est utile en premier lieu pour valider, analyser les performances et définir les incertitudes des modèles d'estimation par satellite. Elle peut aussi être utilisée pour améliorer la précision – par étalonnage – ou même les résolutions spatiales et temporelles par des techniques de fusion.

Concernant plus particulièrement les instruments pyranométriques *in-situ*, le problème réside dans la difficulté de collecte et d'utilisation de longues séries temporelles de mesures pyranométriques *in-situ* de bonne qualité. Ces capteurs pyranométriques *in-situ* sont des instruments de mesures scientifiques très sensibles, soumis aux aléas et aux contraintes de leur environnement et à la qualité et la fréquence de la maintenance. Cette sensibilité est, bien entendu, d'autant plus importante que l'instrument est complexe. Les mesures pyranométriques doivent donc être vérifiées de manière très approfondie et, le cas échéant, l'absence de données peut être compensée par des traitements de sur-échantillonnage et d'agrégation temporelle. Il existe dans la bibliographie de nombreux algorithmes ou méthodologies, plus ou moins complexes, plus ou moins performants, pour le contrôle de qualité, la complétion ou encore le ré-échantillonnage de séries temporelles d'irradiation. Cette diversité nécessite la mise en place de procédures de tests comparatifs et de guides de bonnes pratiques pour aider la communauté scientifique et les utilisateurs d'instruments de mesures *in-situ*.

Il existe plusieurs réseaux de stations pyranométriques *in-situ* issus de différents programmes scientifiques –ou météorologiques – nationaux ou internationaux comme BSRN, GAW¹⁸ (*Global Atmospheric Watch*), WRDC¹⁹ (*World Radiation Data Center*), PIRATA²⁰ (*Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic*) ou encore IDMP²¹ (*International Daylight Measurement Programme*). Il existe en outre un certain nombre de stations pyranométriques « isolées », la plupart mises en place par des compagnies privées pour le développement de projets et le suivi de

¹⁸ www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/measurements.html

¹⁹ wrdc.mgo.rssi.ru/

²⁰ www.pmel.noaa.gov/pirata/

²¹ idmp.entpe.fr/

maintenance de systèmes solaires de production électrique ou énergétique. On assiste, ces dernières années, à l'émergence d'initiatives nationales ou internationales visant à mettre en place des stations pyranométriques *in-situ* – ou même des réseaux – explicitement dédiés à l'énergie solaire. De manière non exhaustive, on peut lister les initiatives suivantes :

- l'initiative « *Renewable Energy Resource Mapping Initiative* » du programme ESMAP²² (*Energy Sector Management Assistance Program*) de la banque mondiale ;
- le programme enerMENA Meteo-Network²³ du centre allemand pour l'aéronautique et l'aérospatiale (DLR, *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) ;
- le programme SRRA²⁴ (*Solar Radiation Resource Assessment*) du ministère indien des énergies nouvelles et renouvelables (Kumar *et al.*, 2013).

Cette diversité des réseaux de stations pyranométriques *in-situ* est évidemment très positive. Néanmoins, la grande hétérogénéité des moyens d'accès, des formats et de caractéristiques des capteurs soulève le problème de la complexité de la collecte des mesures, de leurs harmonisations et de leurs utilisations.

Des efforts doivent être faits pour améliorer l'accès aux mesures, qui doivent utiliser les technologies d'interopérabilité recommandées par le GEOSS par exemple.

Ces quatre verrous scientifiques recoupent une partie des thèmes et du plan de travail du groupe d'experts de la tâche SHC-46 « *Solar Resource Assessment and Forecasting* » programme SHC (*Solar Heating & Cooling*) de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE). En particulier, les verrous A, B et C sont identifiés et abordés dans le cadre de la sous-tâche D « *Advanced Ressource Modeling* » dont j'assume l'animation (*subtask leader*). Le verrou D est lui identifié dans la sous-tâche « *Standardization and Integration Procedures for Data Bankability* ». Les deux autres sous-tâches sont (A) « *Solar Resource Applications for High Penetration of Solar Technologies* » et (C) « *Solar Forecasting* ».

L'essentiel de mes activités de recherche actuelles consiste à développer et à mener à bien des projets visant à améliorer la précision et le degré de caractérisation du rayonnement solaire incident au sol par des moyens d'observation de la Terre, en s'attachant à éliminer, au moins partiellement, les verrous présentés précédemment. Ces activités, au sein de mon groupe de recherche, sont souvent réalisées en collaboration avec d'autres centres de recherche internationaux.

Les sections I-2.2 et I-2.3 proposent une description de deux projets de recherche particuliers qui se sont attachés à apporter des réponses innovantes à certains verrous.

Le premier projet concerne l'établissement d'un atlas du gisement solaire à haute résolution spatiale pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) ([Blanc et al., 2011b](#) ; [Espinar et Blanc, 2012](#)). Compte tenu de l'orographie relativement complexe de cette région, singulièrement dans sa partie sud-est, la résolution spatiale de HelioClim-3 de 3 km est manifestement insuffisante pour être à même de représenter la variabilité spatiale de la ressource sur ce territoire (verrou A). Afin de lever ce verrou, nous avons pris en compte les effets d'ombrage afin d'améliorer, à l'échelle temporelle du mois, la résolution spatiale de 3 km à 200 m. Enfin, l'étalonnage local des séries temporelles de HelioClim-3 par des mesures pyranométriques issues d'une vingtaine de stations pyranométriques dans la région, est un exemple d'approche visant à lever le verrou B sur les problèmes d'incertitude rencontrés par la méthode Heliosat-2 ainsi que le verrou D sur la collecte et l'utilisation de mesure *in-situ* à des fins d'étalonnage.

Le deuxième projet concerne la mise en place d'une nouvelle méthode Heliosat. Cette nouvelle méthode a été nommée Heliosat-4, la méthode Heliosat-3 ayant été proposée il y a quelques

²² www.esmap.org/RE_Mapping

²³ www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-8680/12865_read-32404/

²⁴ niwe.res.in/departement_srara.php

années par l'université d'Oldenburg (Hammer *et al.*, 2003). Cette méthode est radicalement différente de l'approche indirecte de type « indice d'enneigement » de Heliosat-2. Réalisée en partenariat avec le DLR, elle consiste à recourir à une modélisation directe par résolution des équations du transfert radiatif de l'atmosphère dont les paramètres de composition et d'état sont déterminés conjointement par imagerie satellitale et par des modèles numériques météorologiques. Cette méthode « s'attaque » explicitement au verrou B en cherchant à mieux modéliser (1) le rayonnement solaire par ciel clair et (2) les effets conjoints des nuages et de l'albédo du sol. De plus, cette approche physique basée sur les équations du transfert radiatif a le potentiel de mieux décrire le rayonnement solaire dans ses décompositions angulaires et spectrales, apportant ainsi une solution au verrou C.

La section I-2.4 propose une description de mes activités de recherche relative aux instruments de mesure *in-situ* allant des capteurs pyranométriques aux caméras hémisphériques (verrou D).

2.2 Etablissement d'un atlas du rayonnement solaire local à haute résolution spatiale en région PACA

L'atlas du gisement solaire en région PACA est le résultat d'un projet de recherche sur la période 2009-2011. Ce projet, alors labellisé par le pôle de compétitivité CAPENERGIES²⁵, a été cofinancé par la Région PACA et l'ADEME²⁶ (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) au titre de l'accord cadre Etat-Région-ADEME 2007-2013, ainsi que par le département des Alpes Maritimes.

La région PACA dispose d'un formidable potentiel d'énergie renouvelable d'origine solaire. L'atlas du gisement solaire de cette dernière est un ensemble de cartes à 200 m de résolution permettant la caractérisation fine et précise du rayonnement solaire en moyennes multi-annuelles d'irradiations mensuelles et annuelles, suivant ses composantes globale, directe et diffuse.

Diffusé librement et gratuitement par internet, notamment via le site www.atlas-solaire.fr, cet atlas a pour ambition de servir de référence régionale pour l'évaluation du potentiel des filières de conversion photovoltaïque, thermique et thermodynamique du rayonnement solaire. Les différents acteurs publics et privés du domaine utilisent cet atlas pour l'implantation de systèmes de production d'énergie par voie solaire, c'est-à-dire :

- l'identification objective et quantitative des sites d'implantation ;
- le dimensionnement selon l'application visée ;
- l'évaluation fiable de leur rentabilité financière potentielle ainsi que les bénéfices environnementaux.

La haute résolution spatiale de l'atlas est tout à fait adaptée aux besoins des professionnels et installateurs qui sont orientés vers le marché des particuliers, pour la mise en place de systèmes solaires de production d'énergie (chauffe-eau solaire individuel ou collectif, système solaire photovoltaïque).

Dans ce projet, nous avons développé des méthodes spécifiques et innovantes permettant (1) d'augmenter la résolution spatiale d'environ 4,5 km à 200 m en intégrant les effets du relief et de ses ombres portées calculés à partir du modèle numérique de terrain (MNT) SRTM²⁷ dans sa version 4 (verrou A) et (2) d'étalonner et d'estimer les incertitudes des cartes de l'atlas par l'utilisation de stations de mesures pyranométriques propres au projet ou appartenant au réseau de stations météorologiques de Météo France (verrou D).

²⁵ www.capenergies.fr

²⁶ www.ademe.fr

²⁷ SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) : modèle numérique de terrain issu de la mission Shuttle Radar Topography Mission (www2.jpl.nasa.gov/srtm/)

2.2.1 Description des données utilisées

Les irradiances journalières utilisées pour la constitution de l'atlas sont issues de la base de données HelioClim-3 suivant une résolution spatiale de l'ordre de 4,5 km, sur la période allant de 2004 à 2010.

Afin d'étalonner et d'établir les incertitudes des cartes d'irradiation de l'atlas, nous avons considéré les vingt-neuf stations de mesures pyranométriques préexistantes du réseau de Météo France en PACA ainsi que trois stations pyranométriques spécifiques au projet constituées de capteurs de type RSI. Ces différentes stations sont localisées sur la carte présentée par la figure 7 : les stations RSI sont représentées en rouge et celles de Météo France en bleu. Pour ces dernières, une distinction a été faite entre les stations n'ayant pas une orographie marquée dans leur voisinage (disques bleus) et celles, en région montagneuse, affectées de manière non négligeable par des effets d'ombrage du relief (triangles bleus). Lors de l'étape d'étalonnage avec les mesures *in-situ* d'irradiation journalière, les mesures issues de ces dernières ont fait l'objet d'un traitement particulier d'étalonnage intégrant les masques d'horizon correspondants.

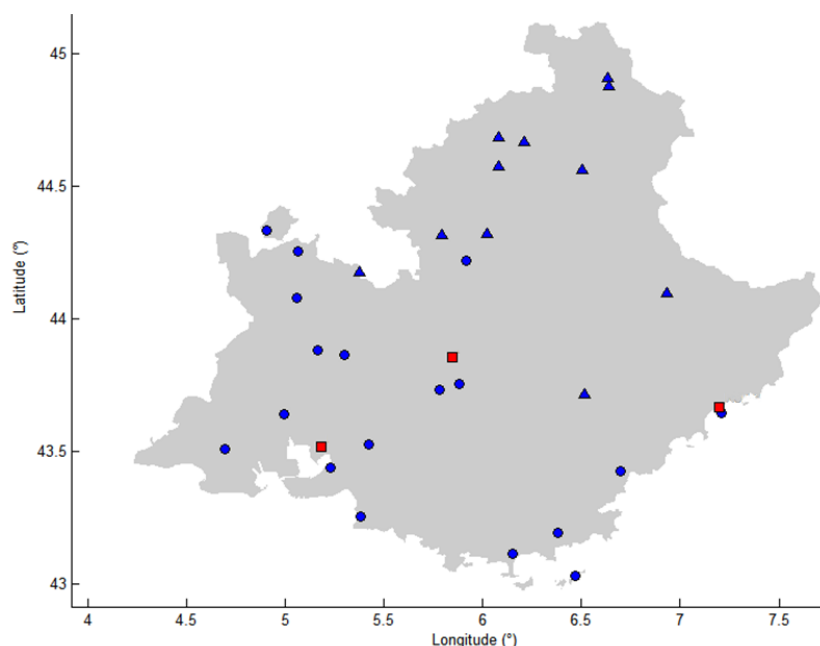


Figure 7 : Localisation en région PACA des stations de mesures pyranométriques utilisées pour l'étalonnage et l'analyse des incertitudes (stations Météo-France en bleu ; stations RSI en rouge).

Les trois stations RSI ont été louées dans le cadre du projet à la société allemande CSP Service. Ces dernières ont fourni les mesures d'irradiances globales et diffuses sur plan horizontal avec une résolution temporelle de 10 min pendant un peu plus d'une année. Ces stations de mesures spécifiques permettent des mesures d'irradiances globales et diffuses de bonne précision – meilleure que 5 % d'erreur quadratique moyenne – et surtout sont, par construction, bien plus robustes à la saleté qui pourrait se déposer sur ses capteurs et aux désalignements que des stations pyranométriques classiques composées de pyranomètres avec système d'ombrage manuel ou automatique et de pyréliomètre sur système de suivi du Soleil (Geuder *et al.* 2003).

Les stations du réseau Météo France en PACA ne mesurent que l'irradiation globale journalière, ou plus rarement horaire, sur le plan horizontal (GHI, *global horizontal irradiation*). Une exception : celle de Carpentras. Elle appartient aussi au réseau de stations pyranométriques du réseau BSRN de très grande qualité et délivre en outre des mesures d'irradiances diffuses sur plan horizontal

(DHI, *diffuse horizontal irradiation*), et directe en incidence normale (DNI, *direct normal irradiation*). Ces mesures sont aussi disponibles au pas de temps de la minute.

Nous avons fait le choix d'un étalonnage des estimations de HelioClim-3 avec les mesures *in-situ* sur la base des valeurs journalières d'irradiation car le nombre de stations de Météo France proposant des telles mesures est bien plus important que celles proposant des données au pas de temps horaire.

Les contrôles de qualité proposés par Geiger *et al.* (2002) et Long et Shi (2006) ont été appliqués sur l'ensemble des données *in-situ*. En outre, une analyse de la répartition temporelle des mesures journalières manquantes a été menée afin d'exclure les stations présentant un nombre de données insuffisantes ou trop mal distribuées sur la période 2004-2010.

En définitive, vingt stations de Météo France et les trois stations RSI ont été considérées pour l'étalonnage et l'analyse des incertitudes.

En premier lieu, une méthode d'étalonnage paramétrique a été déterminée. Cet étalonnage cherche à minimiser les erreurs de HelioClim-3 exprimées en indice de ciel clarté défini comme le rapport de l'irradiation globale horizontale journalière sur irradiation horizontale hors atmosphère correspondante.

On cherche ainsi à établir, par station, une régression linéaire au sens des moindres carrés de l'indice de clarté des mesures *in-situ* avec celui de HelioClim-3 et d'autres variables explicatives qui sont respectivement le numéro de jour d'année et son carré. Le terme binomial en fonction du jour dans l'année permet de corriger des effets saisonniers observés dans les erreurs d'estimation de l'indice de clarté.

Conçue à l'origine pour l'étalonnage des données de rayonnement solaire de l'atlas PACA, cette méthode a été étudiée et validée pour l'étalonnage locale des séries de long terme de HelioClim-3 – 10 ans et plus – avec des mesures *in-situ* de court terme – 1 an et moins – pour des études technico-économiques de faisabilité de projets de conversion photovoltaïque de l'énergie solaire (Vernay *et al.*, 2012 ; Vernay *et al.* 2013).

Ces coefficients d'étalonnage par station ont alors été géographiquement « propagés » par interpolation sur l'ensemble de la région PACA. Plusieurs méthodes d'interpolation (krigeage, pondération inverse à la distance, plaques minces, etc.) à partir d'un semis de points irrégulièrement répartis, ont été testées. Ces tests ont été basés sur des analyses statistiques par validations croisées de type LOOCV (*Leave-One-Out Cross-Validation*). En plus de ces analyses par validations croisées, les trois stations RSI ont été utilisées comme stations de test. Elles ont été utilisées uniquement pour tester la pertinence des coefficients d'étalonnage obtenus par interpolation des coefficients déterminés sur les stations de Météo France. En définitive, la solution d'interpolation des coefficients d'étalonnage choisie pour ses performances est celle des plaques minces (Wahba, 1990).

2.2.2 Augmentation de la résolution spatiale par la prise en compte de l'orographie

Afin d'augmenter la résolution spatiale de la base de données HelioClim-3 de 4,5 km à 200 m, nous avons exploité deux sources de variabilité intra-pixel liées au relief :

- la variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère : les éclaircissements de chaque pixel de HelioClim-3 ont été évalués pour une altitude moyenne. L'estimation pour un site intra-pixel doit donc tenir compte de la différence entre son altitude et celle du pixel pour compenser, le cas échéant, l'épaisseur optique de l'atmosphère (Abdel Wahab *et al.*, 2008) ;
- les effets d'ombre portée du relief avoisinant le site intra-pixel considéré. L'estimation pour un site intra-pixel doit donc tenir compte de son horizon potentiellement occulté notamment par le relief avoisinant. Cette prise en compte utilise un modèle spécifique proposé par Ruiz-Arias *et*

al. (2010) distinguant les effets d'ombrage sur les composantes directe, diffuse circumsolaire et diffuse isotrope du rayonnement solaire incident au sol.

Un algorithme rapide a été développé pour déterminer à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) à meilleure résolution spatiale que HelioClim-3 – ici le MNT SRTM v4 à environ 90 m de résolution – l'horizon pour un lieu donné. La figure 8 montre deux exemples de calcul d'horizon pour deux lieux en Corse pour lesquels un relevé par théodolite a été effectué par un étudiant de l'université de Corse, M. Haurant. Ce dernier, alors doctorant, avait pour objectif de s'inspirer des méthodes mises en place pour l'atlas PACA pour produire un atlas solaire à haute résolution spatiale de la Corse (Haurant *et al.*, 2012).

La figure 8 montre la comparaison entre les relevés par théodolite et la modélisation avec le MNT SRTM v4, présentée par la suite. La zone rouge semi-transparente correspond à l'estimation de l'incertitude d'estimation de l'horizon par MNT. Cette incertitude a été établie en évaluant l'impact de l'erreur altimétrique typique de SRTM – de l'ordre de 10 m – en fonction de la distance à laquelle se trouve le point d'horizon. En effet, plus ce point est proche de l'observateur, plus l'erreur d'altimétrie génère une erreur importante dans l'estimation angulaire de l'horizon. On note que pour le site près de Corte, la correspondance est excellente : l'erreur quadratique moyenne est alors ici de 0,45°.

Par contre, l'écart est plus important pour le site près de Soviera avec une erreur quadratique moyenne de 1,8°. Cependant, le relief est dans ce cas précis très proche de l'observateur pour la partie nord à sud-est (de l'ordre de 200 m) et donc l'erreur altimétrique de SRTM génère une incertitude relativement importante sur l'évaluation de l'horizon dans cette zone. D'ailleurs les relevés faits par théodolite sont globalement dans la zone d'incertitude.

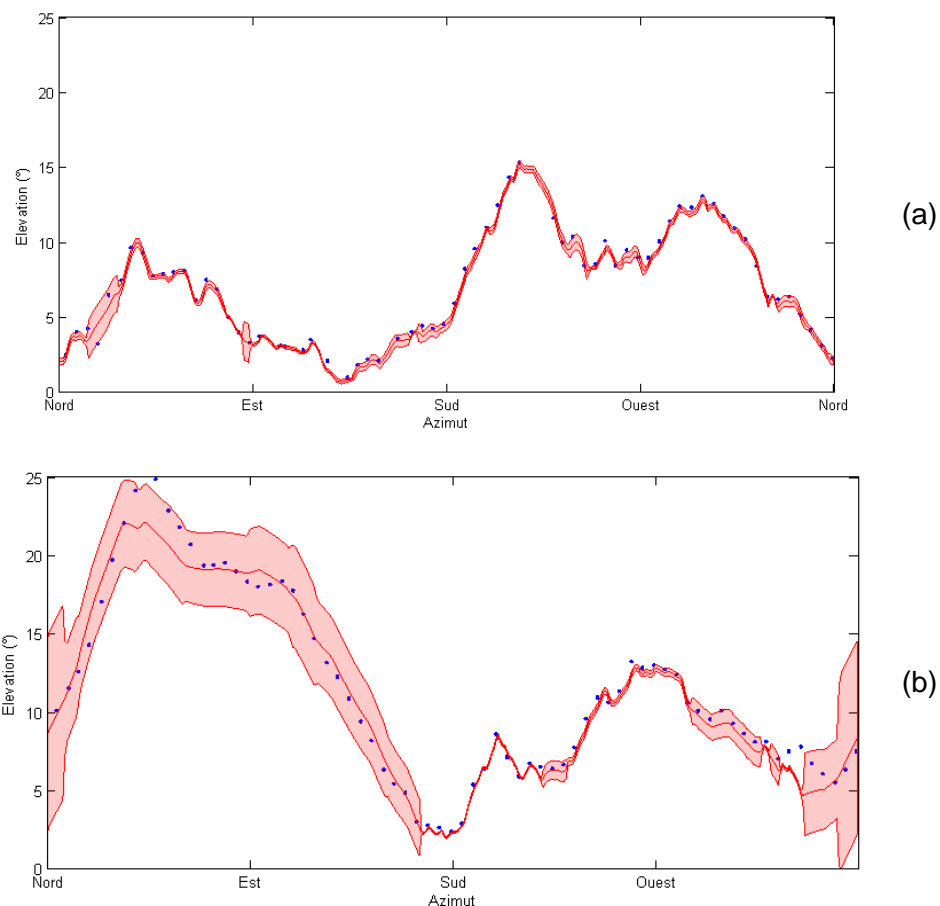


Figure 8 : Comparaison des relevés par théodolites et par calcul à partir du MNT SRTM v4 à Corte (a) et Soviera (b) en Corse. Les relevés par théodolites ont été effectués par un doctorant de l'université de Corse, Pierrick Haurant.

La figure 9 montre, pour Soviera, la superposition de l'horizon calculé avec le MNT SRTM v4 avec la course du soleil au cours de l'année.

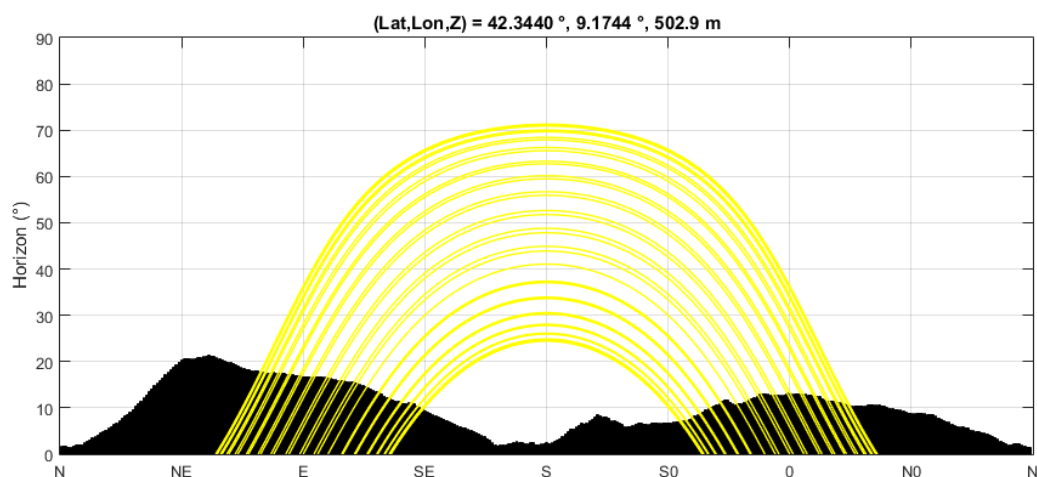


Figure 9 : Exemple de superposition de l'horizon (en noir) calculé avec le MNT SRTM v4 à Soviera (Corse) avec la course du Soleil au cours de l'année (en jaune).

2.2.3 Résultats et analyse des incertitudes

L'application des étalonnages avec les mesures *in-situ* et l'intégration des effets de relief au pas de 200 m a permis de générer des cartes annuelles et mensuelles d'irradiations globales, directes et diffuses sur plusieurs plans inclinés typiques, en plus du plan horizontal et du plan normal.

La figure 11 montre deux exemples de cartes de la ressource solaire à 200 m sur la région PACA, présentant les moyennes multi-annuelles d'irradiations annuelles respectivement globales sur plan horizontal (GHI) et directes en incidence normale (DNI).

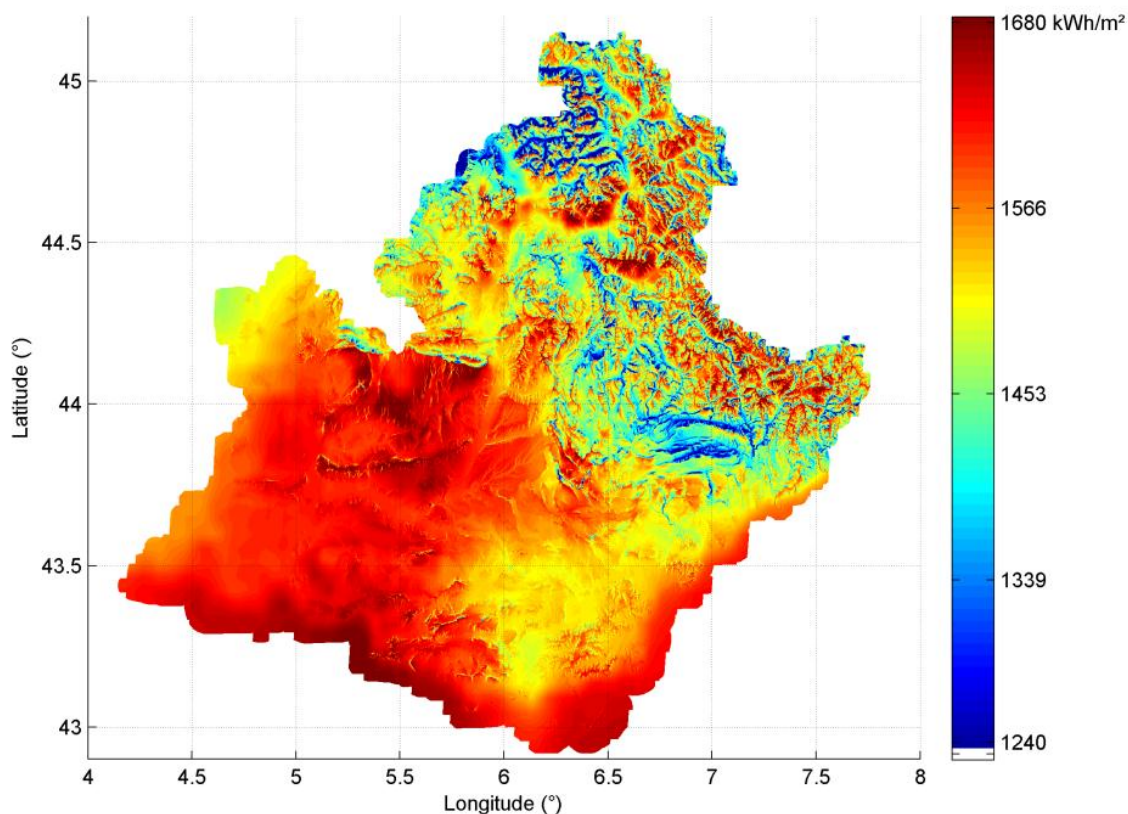


Figure 10 : Carte de la moyenne multi-annuelle (2004-2010) de l'irradiation globale horizontale (GHI) annuelle exprimée en kWh/m².

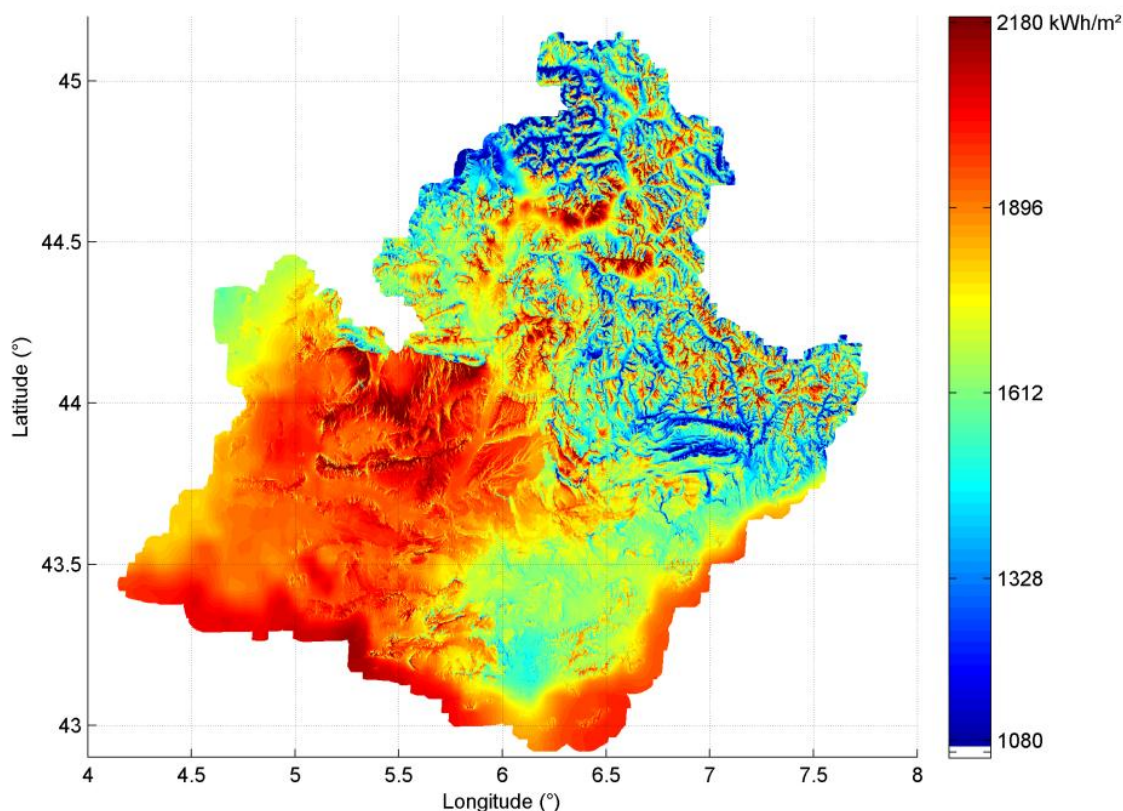


Figure 11 : Carte de la moyenne multi annuelle (2004-2010) de l'irradiation directe en incidence normale (DNI) annuelle exprimée en kWh/m².

Le tableau ci-dessous présente les statistiques d'erreur d'estimation de l'irradiation mensuelle globale horizontale par HelioClim-3 sans prise en compte de l'orographie et de l'étalonnage, par rapport aux mesures *in-situ*. Ces statistiques d'erreur sont les suivantes :

- MBE (*Mean Bias Error*), correspondant au biais d'estimation exprimé en % par rapport à la moyenne de référence (MREF, *Mean of Reference*) ;
- MAE (*Mean Absolute Error*) correspondant à la moyenne des écarts en valeur absolue, exprimée en % par rapport à la moyenne de référence ;
- RMSE (*Root Mean Square Error*), correspondant à l'erreur quadratique moyenne exprimée en % par rapport à la moyenne de référence ;
- CC (*Correlation Coefficient*), correspondant au coefficient de corrélation entre l'irradiation estimée et l'irradiation mesurée.

NDA (*Number of Data*) correspond au nombre de données valides sur lesquelles sont établies les statistiques.

	NDA	MREF	MBE	MAE	RMSE	CC
GHI mensuelles Ref. : 20 stations Météo France	1269 mois	132,2 kWh/m2	5,3 %	7,5 %	10,1 %	0,992

Tableau 1 : Résultats des analyses statistiques des erreurs d'estimation du GHI de HelioClim-3 sans étalonnage ni prise en compte de l'orographie par comparaison avec les mesures *in-situ* des 20 stations de Météo France.

Le biais global de 5,3 % et l'erreur quadratique moyenne globale de 10,1 % cache de relativement fortes disparités de ces statistiques par stations, notamment celles situées dans des zones montagneuses présentant une orographie très marquée. La figure 12 représente sous forme de disques concentriques les biais et erreurs quadratiques moyennes par station.

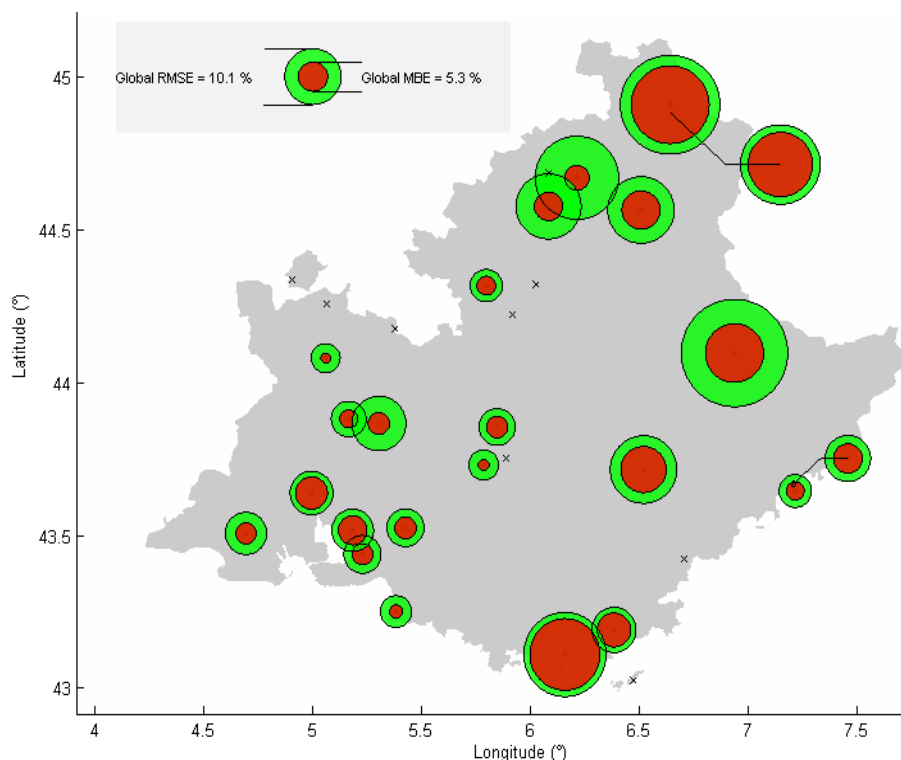


Figure 12 : Représentation graphique des erreurs d'estimations du GHI mensuel de HelioClim-3 sans étalonnage ni prise en compte de l'orographie. Les disques rouges représentent le biais MBE par station, respectivement positif ou négatif. Les disques verts représentent le RMSE par station. Les croix noires représentent les stations de Météo France non utilisées lors de la comparaison, exclues lors du contrôle de qualité.

L'étalonnage et la prise en compte de l'orographie ont permis de réduire considérablement les erreurs d'estimation. Le tableau 2 montre les résultats des analyses statistiques des erreurs après ces traitements.

La première ligne (A) montre les écarts constatés sur les 20 stations de Météo France qui ont été utilisées lors de l'étalonnage. La seconde ligne (B) montre les écarts constatés lors de l'analyse par validations croisées LOOCV. Enfin, la troisième ligne (C) montre les écarts constatés sur les trois stations RSI utilisées comme stations de test de l'étalonnage. La figure 13 montre les MBE et RMSE par stations avec les mêmes échelles que pour la figure 12.

Compte tenu de ces résultats, on peut conclure que les biais après étalonnage sont faibles, de moins 2 % par station, avec un biais global inférieur à 1 %. Les erreurs quadratiques moyennes sont globalement de l'ordre de 5 % à 6 % en moyenne mais sont généralement de l'ordre de 3,5 % pour les stations en région non montagneuse et de l'ordre de 6 à 8 % pour les stations en région montagneuse.

	NDA	MREF	MBE	MAE	RMSE	CC
A. GHI mensuelles Ref. : 20 stations Météo France	1269 mois	132 kWh/m ²	-0,2 %	3,1 %	4,3 %	0,996
B. GHI mensuelles - LOOCV Ref. : 20 stations Météo France	1267 mois	132 kWh/m ²	-0,7 %	4,4 %	6,2 %	0,991
C. GHI mensuelles Test : 3 stations RSI	38 mois	126 kWh/m ²	0,4 %	2,5 %	3,1 %	0,998

Tableau 2 : Résultats des analyses statistiques des erreurs d'estimation du GHI de HelioClim-3 avec étalonnage et prise en compte de l'orographie par comparaison avec les mesures *in-situ* des 20 stations de Météo France et des trois stations RSI.

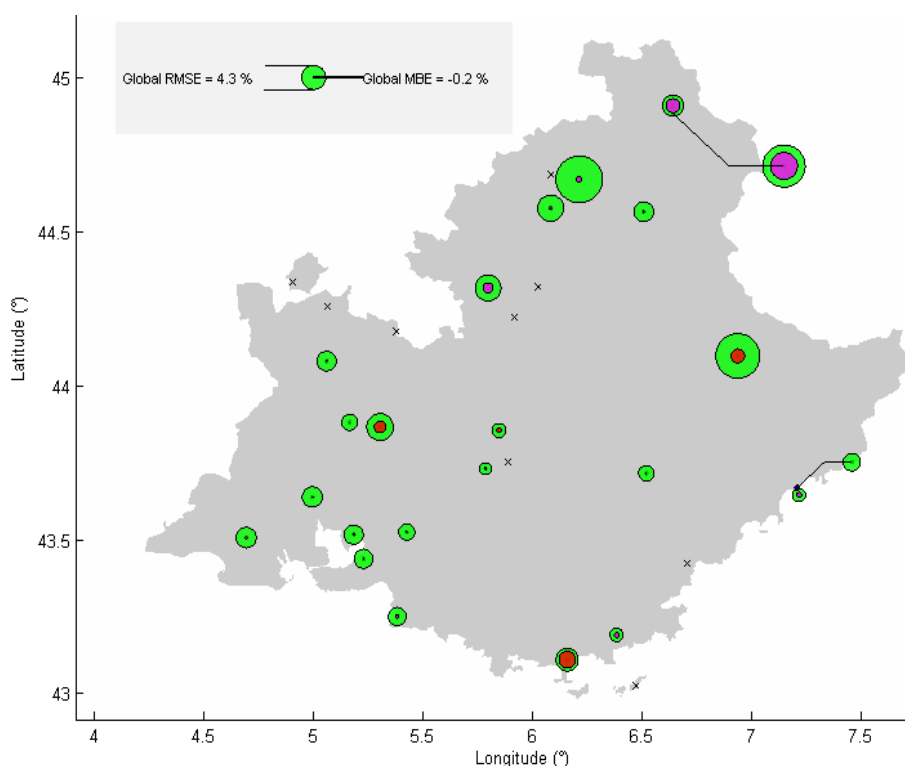


Figure 13 : Représentation graphique des erreurs d'estimations du GHI de HelioClim-3 après étalonnage et prise en compte de l'orographie, avec le même code de couleur et les mêmes échelles pour les disques que la figure 12.

Sur la base de la comparaison avec les mesures *in-situ* issues de la station de Météo France à Carpentras et des trois stations RSI, les estimations de l'irradiation directe mensuelle en incidence normale présentent un biais de moins de 1 %, une erreur quadratique moyenne de moins de 8 % et un coefficient de corrélation de 0,977.

Ces niveaux d'incertitude sur les valeurs mensuelles de GHI et DNI sont tout à fait acceptables pour l'usage de l'atlas : celui de faire des études de préféabilité et des analyses de prospection de sites, par exemple pour des projets photovoltaïque, avec un système d'information géographique (SIG) .

2.2.4 Conclusion

La méthodologie utilisée pour créer l'atlas à haute résolution spatiale (200 m) du gisement solaire de la région PACA était, en 2010, une innovation avec la prise en compte de l'orographie pour l'augmentation de la résolution spatiale et l'étalonnage avec des mesures *in-situ*. Un rapport détaille la méthodologie et la validation des cartes de rayonnement solaire de l'atlas ([Blanc, 2011](#)).

Il est disponible sur www.atlas-solaire.fr. Ce dernier a aussi fait l'objet d'une communication internationale avec actes ([Blanc et al., 2011b](#)) ainsi que d'une partie d'un chapitre d'un ouvrage collectif ([Espinar et al., 2012](#)).

Dans le cadre du projet européen FP7²⁸ ENDORSE²⁹, la méthodologie de la constitution d'un atlas solaire régional à haute résolution a été améliorée et étendue. Notamment, cet atlas a été enrichi de couches d'informations géographiques supplémentaires qui sont d'intérêt pour la prospection, avec un SIG, de sites potentiels pour des projets de centrales photovoltaïques. De manière non exhaustive, ces couches supplémentaires comprennent des cartes de température et de vitesse de vent en moyennes mensuelles, une carte de distance aux postes sources du réseau électrique, une carte des pentes locales du terrain issues du MNT SRTM v4, des cartes d'occupation des sols, des risques d'inondation ou encore des limites administratives (parcs naturels, limites des départements, communes, etc.).

Le choix, l'élaboration et les moyens de dissémination de ces couches ont été réalisés avec le support et les avis éclairés des services SIG du conseil général des Alpes-Maritimes et de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) de la région PACA et de l'ADEME. L'ensemble de ces couches géographiques de l'atlas en région PACA sont disponibles gratuitement via un WMS (*Web Map Service*) dont le point d'entrée (*GetCapabilities*) est à l'adresse suivante :

geoserver.webservice-energy.org/geoserver/paca/wms?version=1.3.0&REQUEST=GetCapabilities

Un exemple de visualisation de ces cartes à travers des requêtes sur le WMS de l'atlas se trouve à l'adresse suivante :

www.webservice-energy.org/viewer/heron/applications/atlas-paca/

2.3 Etablissement d'une nouvelle méthode : Heliosat-4

Les méthodes d'estimation de l'éclairement solaire au sol de type « indice d'ennuagement » comme la méthode Heliosat-2 actuellement utilisée opérationnellement pour la base de données HelioClim-3 présentent des avantages déterminants d'ordre opérationnel : portant uniquement sur un canal visible des capteurs spatio-portés, elles sont relativement faciles à adapter et à mettre en œuvre sur les différents satellites météorologiques à travers le monde (GOES, *Meteosat*, Feng-Yung, HIMAWARI, etc.). Leurs faibles complexités calculatoires et algorithmiques permettent de plus une mise en opération en quasi-temps réel, ouvrant ainsi la voie à une exploitation pour le suivi et la prévision à court terme (cf. section III-2).

Cependant, les limitations de ces approches énoncées précédemment (verrou C) liées essentiellement à leurs empirismes nous ont poussés à changer de paradigme en tentant de répondre à la question suivante : peut-on envisager des approches d'estimation du rayonnement solaire incident au sol basées sur la résolution de transfert radiatif, à partir de données issues de l'observation de la Terre – satellites météorologiques, modèles numériques météorologique ou de chimie-transport – sur l'état optique de l'atmosphère et sur l'albédo du sol qui puissent être mises en œuvre de manière opérationnelle dans des conditions raisonnables ?

La réponse à cette question s'est concrétisée par la mise en œuvre d'une nouvelle approche nommée Heliosat-4 avec notamment deux thèses que j'ai co-encadrées ([Oumbé, 2009](#) ; [Qu, 2013](#)). Ces travaux de recherche ont été supportés par les différents projets FP7 MACC³⁰ et MACC-II et H2020³¹ MACC-III, ainsi que par le projet PREDISOL (2011-2014) financé par TOTAL New Energies.

²⁸ FP7 : *Seventh Framework Programme* (2007-2013) : cordis.europa.eu/fp7/home_en.html

²⁹ www.endorse-fp7.eu

³⁰ MACC (*Monitoring Atmospheric Composition & Climate*) : www.gmes-atmosphere.eu/

³¹ H2020 : programme de recherche et innovation de la commission européenne sur la période 2014-2020 : ec.europa.eu/programmes/horizon2020

2.3.1 Découplage des effets des nuages et de ceux de l'atmosphère claire (sans nuage)

De nombreuses simulations numériques par tirages de Monte-Carlo du transfert radiatif ont été effectuées afin d'estimer l'impact de la variation des constituants atmosphériques de ciel clair les plus notables : aérosols, ozone, vapeur d'eau, sur l'éclairement par ciel nuageux. La résolution des équations de transfert radiatif a été réalisée avec l'aide du modèle numérique de transfert radiatif libRadtran (Mayer and Killing, 2005) avec l'utilisation du solveur DISORT (*Discrete Ordinates Radiative Transfer*).

Ces simulations ont permis d'obtenir un résultat sur la séparation – ou le découplage – des effets du ciel clair sur l'éclairement par ciel nuageux.

Désignons par B , G , B_c et G_c respectivement les éclairagements totaux direct et global sur plan horizontal pour tout ciel et par ciel clair (indice c). Les indices de ciel clair K_{cb} et K_c sont définis respectivement pour les composantes directe et globale par :

$$\begin{aligned} B &= B_c(\theta_s, P_c) K_{cb}(\theta_s, P_c, P_{nuage}) \\ G &= G_c(\theta_s, \rho_g, P_c) K_c(\theta_s, \rho_g, P_c, P_{nuage}) \end{aligned} \quad (1)$$

où :

- θ_s est l'angle solaire zénithal ;
- ρ_g est l'albédo du sol ;
- P_c est un ensemble de variables décrivant l'état optique de l'atmosphère claire comme le contenu de la colonne atmosphérique en ozone et vapeur d'eau, le profil vertical de température, la pression, la densité, et le rapport de mélange des gaz, les épaisseurs optiques des aérosols à différentes longueurs d'onde, le type d'aérosol ou encore l'altitude du sol au-dessus du niveau moyen de la mer ;
- P_{nuage} est un ensemble de variables décrivant le nuage comme son épaisseur optique, son contenu en eau liquide, le rayon effectif des gouttelettes d'eau, sa phase (gouttelettes d'eau ou cristaux de glace) ou encore les altitudes de sa base et de son sommet.

Nos analyses ont permis de montrer qu'il est possible de négliger la dépendance des indices de ciel clair K_{cb} et K_c vis-à-vis des paramètres de ciel clair P_c (Oumbe et al., 2014). Ainsi, si l'on note par P_{c0} des paramètres de ciel clair typiques et constants, on peut faire l'approximation suivante :

$$\begin{aligned} B &\approx B_c(\theta_s, P_c) K_{cb}(\theta_s, P_{c0}, P_{nuage}) \\ G &\approx G_c(\theta_s, \rho_g, P_c) K_c(\theta_s, \rho_g, P_{c0}, P_{nuage}) \end{aligned} \quad (2)$$

L'erreur faite en utilisant cette approximation dépend essentiellement de l'angle solaire zénithal, de l'albédo du sol et de l'épaisseur optique du nuage. Plus précisément, ces erreurs sont maximales pour des situations conjointes d'angle solaire zénithal important, d'albédo élevé (supérieur à 0,7) et de forte couverture nuageuse, situations pour lesquelles les valeurs absolues des éclairagements et donc des erreurs sont faibles.

Ainsi, lors des tirages de Monte-Carlo, dans 95 % des situations, l'erreur sur les éclairagements direct et global est inférieure à 15 W m^{-2} , soit une erreur similaire aux recommandations de l'OMM pour des mesures de haute qualité.

Ce résultat, exploité dans la méthode Heliosat-4, a une grande portée pratique pour l'estimation de l'éclairement de manière opérationnelle. En effet, cela signifie que deux modèles peuvent être développés séparément : un pour le cas du ciel clair, un autre pour les indices de ciel clair. Chaque modèle peut en outre avoir son propre jeu de données d'entrée avec ses propres résolutions temporelles et spatiales limitées par les moyens d'observation de la Terre dont ces données sont issues.

Heliosat-4 est ainsi constitué de deux modèles :

- le modèle McClear qui estime l'éclairement par ciel clair B_c et G_c ;
- le modèle McCloud qui estime les indices de ciel clair K_{cb} et K_c .

La figure 14 montre le schéma de fonctionnement de la méthode Heliosat-4 avec l'articulation entre ses deux modèles.

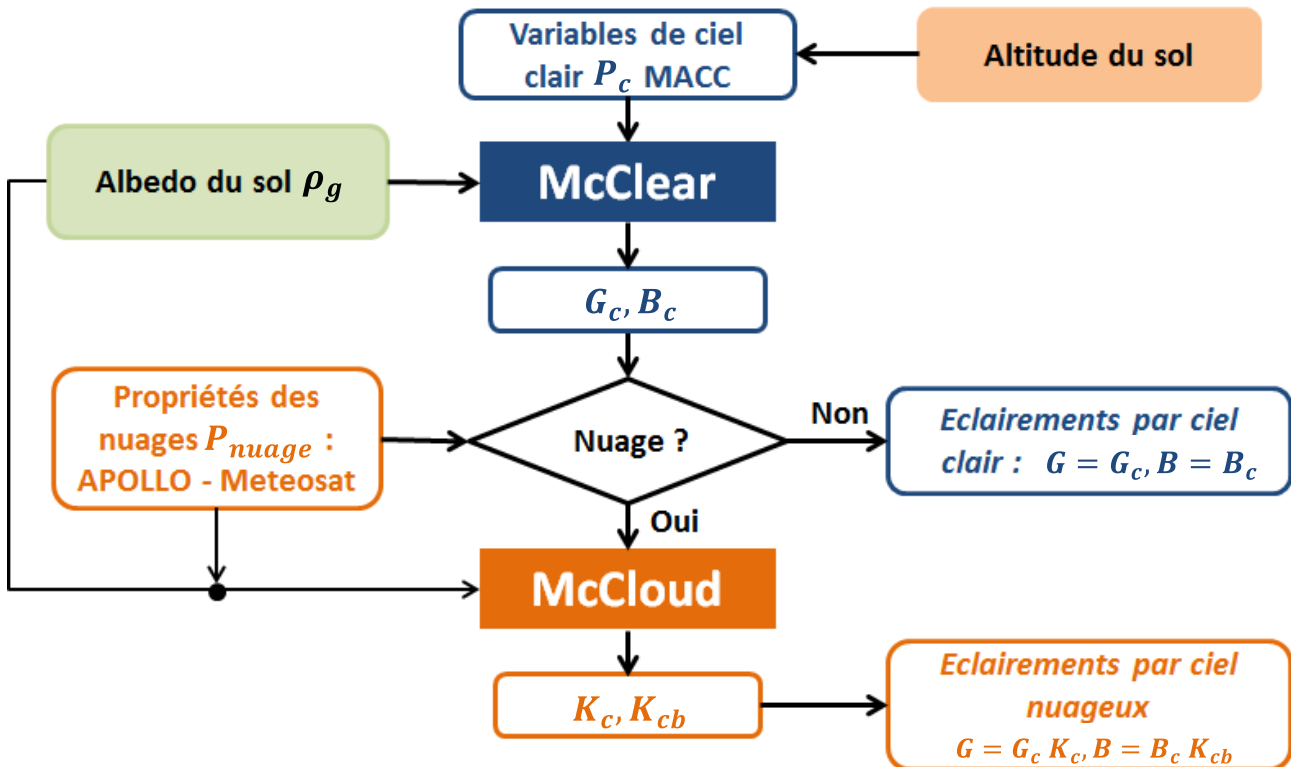


Figure 14 : Schéma de fonctionnement de la méthode Heliosat-4 présentant l'articulation entre ses deux modèles principaux : McCclear et McCloud.

2.3.2 McCclear : le modèle d'éclairement par ciel clair

L'objectif du modèle McCclear est de déterminer, à partir de données globales issues de l'observation de la Terre, sur la base de la résolution des équations de transfert radiatif, les éclairements solaires incidents directs et globaux par ciel clair.

Une étude de sensibilité menée avec libRadtran a permis de définir les dix variables les plus importantes vis-à-vis de l'évaluation des éclairements par ciel clair, sur le lieu considéré, la position du Soleil, l'état optique de l'atmosphère sans nuage et la nature du sol :

- l'altitude du site et l'élévation considérée au-dessus du sol (km) ;
- l'éclairement hors atmosphère de l'instant considéré (W/m^2) ;
- l'angle solaire zénithal de l'instant considéré (rad) ;
- l'épaisseur optique des aérosols (AOD, *Aerosol Optical Depth*) à 550 nm ;
- l'exposant d'Ångström pour la dépendance de cette dernière à d'autres longueurs d'onde ;
- le type d'aérosol parmi les neuf types d'aérosols de la base de données OPAC (*Optical Properties of Aerosols and Clouds*) proposée par Hess *et al.* (1998) ;
- le contenu total en vapeur d'eau (g/m^3) ;
- le contenu total en ozone DU (*Dobson Unit*) ;
- un profil atmosphérique type définissant les profils verticaux de température, de pression, de densité et de rapports de mélange des gaz. Ces profils typiques proviennent d'une librairie de profils type nommée AFGL (*Air Force Geophysics Laboratory*) ;
- l'albédo du sol.

Il faut alors distinguer dans McClear les modèles numériques et les données sources en entrée de ces modèles afin de renseigner les 10 variables listées ci-dessus.

▪ Les modèles numériques de McClear

McCclear nécessite en premier lieu le calcul précis et rapide de la distance Terre-Soleil ainsi que des angles solaires topocentriques afin de connaître l'éclairement hors atmosphère mais également l'angle solaire zénithal (SZA, *Solar Zenithal Angle*) pour un lieu et un instant donné. L'algorithme SPA (*Solar Position Algorithm*) proposé par Reda et Andreas (2003) est l'algorithme de référence. Il est très précis – meilleur que la seconde d'arc (1 arcsec^{32}) – sur une très grande plage annuelle – des années -2000 à +6000 – mais nécessite des temps de calcul rédhibitoires pour une utilisation opérationnelle de la méthode Heliosat-4.

Des algorithmes rapides de calcul de la position du Soleil existaient alors mais ne permettaient pas d'atteindre la précision angulaire requise de moins de 15 arcsec sur la période 1980-2030 prévue pour l'ensemble des bases de données HelioClim.

C'est la raison pour laquelle nous avons établi des approximations des différentes étapes de calcul de SPA par des séries de Fourier tronquées permettant de réduire de manière drastique le nombre d'opérations notamment trigonométriques, tout en contrôlant les bornes d'erreur maximale. Ces différentes approximations ont donné lieu à un nouvel algorithme, SG2 (*Solar Geometry 2*) qui est 15 fois plus rapide que SPA, avec une erreur maximale de 10 arcsec sur la période requise ([Blanc et Wald, 2012](#)). L'algorithme, développé dans le cadre du projet FP7 ENDORSE, est disponible en [téléchargement](#) dans sa version en langage C ou en Matlab. La figure 15 montre une comparaison des erreurs de calcul de position du Soleil sur la période 1980-2030 de plusieurs algorithmes rapides dont SG2: SG (*solar geometry Wald et al., 2000*), MICH (Michalsky, 1988), ENEA (Grena, 2008).

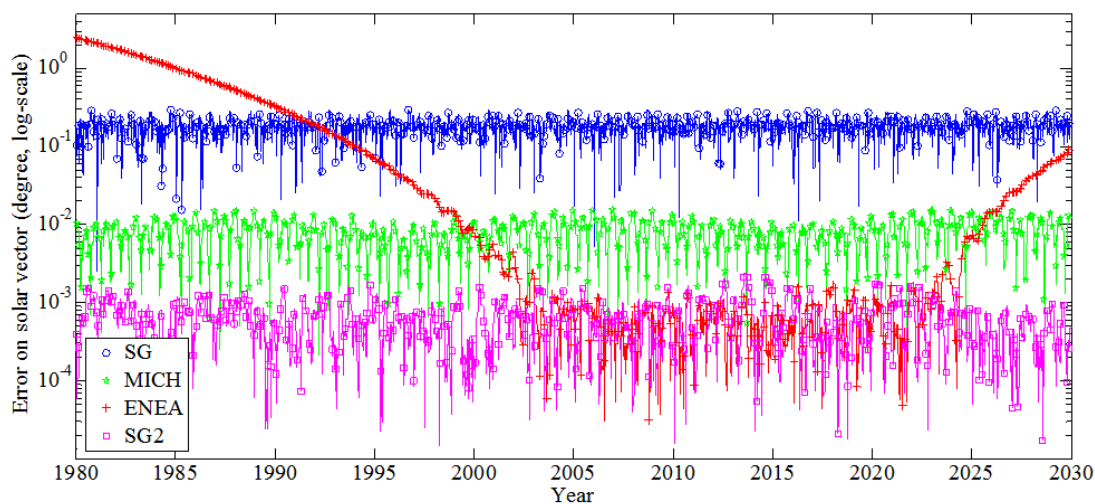


Figure 15 : Illustration de la précision de l'algorithme rapide de calcul de position du Soleil SG2 par rapport à l'algorithme de référence SPA. Les algorithmes SG, MICH et ENEA sont des algorithmes rapides de calcul de la position du Soleil issus de la bibliographie (voir texte). Cette figure est extraite de [Blanc et Wald \(2012\)](#).

McCclear s'appuie ensuite sur la résolution des équations de transfert radiatif pour évaluer les éclairements solaires incidents au sol hors nuage, connaissant les 10 variables. Cette résolution

³² $1 \text{ arcsec} = 1/3600^\circ \approx 2.78 \times 10^{-4} \approx 4.85 \text{ } \mu\text{rad}$

est assurée par l'outil libRadtran en utilisant le solveur DISORT. Elle requiert cependant beaucoup de temps de calcul et est donc, à l'instar de SPA, incompatible avec une implémentation opérationnelle de Heliosat-4.

Pour pallier cette difficulté, nous avons eu recours à des abaques. Un abaque est une table à multiples entrées – ici de dimension 10 – donnant B_c et G_c , pour des valeurs sélectionnées des entrées, qu'on appelle nœuds. Les valeurs de rayonnement aux nœuds sont calculées une fois pour toutes grâce à libRadtran, qui est exécuté pour chacun des jeux d'entrées sélectionnés. Ce calcul est très exigeant en termes de ressources informatiques mais n'est effectué qu'une fois. Les éclaircissements sont ensuite calculés pour n'importe quel jeu de valeurs d'entrée par des interpolations des rayonnements connus aux nœuds.

Le nombre, le choix des nœuds des différentes entrées ainsi que les méthodes d'interpolation spécifiques entre les nœuds ont fait l'objet d'études publiées ([Qu et al., 2011](#) ; [Lefèvre et al., 2013](#)) afin de déterminer des abaques les plus précis possibles en minimisant le nombre de nœuds nécessaires permettant de diminuer :

- le temps de génération des abaques ;
- leur taille en mémoire ;
- le temps nécessaire à l'interpolation entre les nœuds lors de son utilisation opérationnelle.

Ces études ont eu recours, pour l'évaluation statistique des erreurs, à des tirages de Monte Carlo avec des densités de probabilité typiques pour chacune des entrées. En définitive, le modèle McClear comprend 1674 abaques, chacun contenant $4 \times 12 \times 10 \times 9 \times 8 \times 5 \times 6 = 1\,036\,800$ nœuds.

Les interpolations entre les nœuds sont de type linéaire à l'exception de :

- de l'interpolation vis-à-vis de l'angle solaire zénithal : cette interpolation repose sur une version modifiée de la relation Lambert-Beer (MLB, *Modified Lambert-Beer*) définie par morceaux sur plusieurs intervalles de l'angle solaire zénithal ;
- de l'interpolation vis-à-vis de l'albédo qui fait appel à une technique particulière de résolution polynomiale.

En définitive, le modèle d'abaques de McClear permet une approximation précise de libRadtran avec des biais de moins de 3 W m^{-2} et des erreurs inférieures à 20 W m^{-2} pour 95 % des situations tirées aléatoirement lors des analyses par Monte Carlo. Le temps d'exécution des interpolations par abaques est de l'ordre de 10^5 plus rapide que libRadtran.

▪ Les données sources pour les entrées des abaques de McClear

Lorsque le ciel est sans nuage, les aérosols jouent un rôle prépondérant dans l'atténuation du rayonnement par leurs propriétés de diffusion et pour certains d'absorption. Les propriétés optiques des aérosols et leur concentration étaient peu connues il y a quelques années. Seules des cartes grossières de leur répartition, à échelle spatiale grossière et de type climatologique à l'échelle mensuelle ou annuelle, étaient proposées et utilisées. Il s'ensuit que les éclaircissements par ciel clair estimées en utilisant des valeurs typiques pour les aérosols ne reproduisaient qu'imparfaitement les observations : les variabilités spatiales à plus fines échelles et les variabilités temporelles à la fois interannuelles et intra-mensuelles ne pouvaient pas être reproduites.

Les projets FP7 MACC ont levé au moins partiellement ce verrou en produisant et fournissant des estimations des épaisseurs optiques des aérosols pour différentes longueurs d'onde toutes les trois heures pour le monde entier suivant une résolution spatiale de l'ordre de 100 km, et ce depuis janvier 2003 en mode analyse et prévision à trois puis cinq jours et de janvier 2003 à décembre 2012 en mode ré-analyse. Ces épaisseurs optiques des aérosols sont estimées séparément pour plusieurs espèces d'aérosol et ainsi que pour tous types confondus.

La figure 16 montre un exemple de carte globale d'épaisseur optique des aérosols à 550 nm. Ces estimations sont issues de MACC-IFS-NRT, produit d'un couplage entre un modèle numérique météorologique et un modèle numérique de chimie-transport. Ce modèle couplé permet en outre l'estimation de la valeur totale du contenu en vapeur d'eau et en ozone qui est utilisé par McClear.

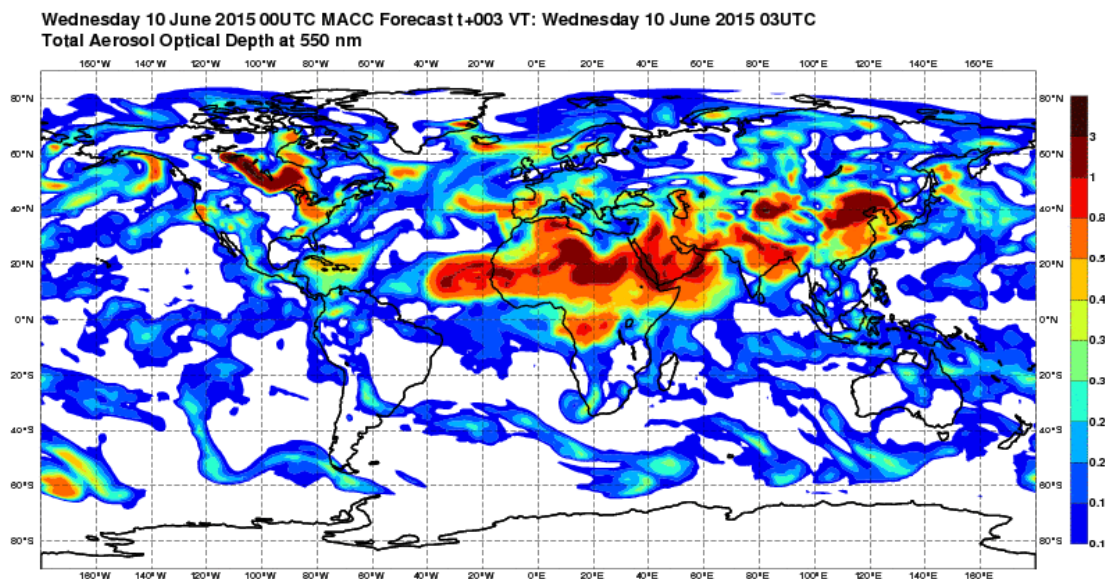


Figure 16 : Exemple de carte globale d'épaisseur optique (sans unité) des aérosols à 550 nm estimée par MACC (modèle MACC-IFS-NRT) le mercredi 10 juin à 3 h UT (www.copernicus-atmosphere.eu/d/services/gac/nrt/nrt_opticaldepth).

Nous avons contribué à l'évaluation des performances d'estimation des épaisseurs optiques des aérosols issues de MACC avec notamment une communication en 2014 à la conférence internationale *European Meteorology Society* ([Salamalikis et al., 2014](#)). Dans cette communication, en partenariat avec l'université de Patras (Grèce), nous avons comparé les estimations d'épaisseur optique des aérosols pour deux longueurs d'onde – 550 nm et 1240 nm – avec les mesures *in-situ* issues du réseau de photomètres solaires AERONET³³ (*AEROSOL ROBOTIC NETWORK*) et évalué les impacts des erreurs de ces estimations sur les calculs faits par McClear.

Cette analyse à l'échelle du globe a notamment permis de mettre en évidence que les performances d'estimation de MACC ne sont pas homogènes spatialement. En effet, les coefficients de corrélation sont généralement supérieurs à 0,7 pour les stations AERONET en Europe, en Afrique du Nord, en Asie, sur la partie est de l'Amérique du Nord et la partie centrale de l'Amérique du Sud. Ces coefficients de corrélation peuvent être très faibles – inférieurs en valeur absolue à 0,2 – ou négatifs pour des stations notamment sur la côte ouest de l'Amérique ou sur la partie sud de l'Australie. Les erreurs relatives d'estimation des épaisseurs optiques des aérosols sont, en biais, inférieures à 20 % en valeur absolue et en erreur quadratique moyenne inférieures à 30 %. Ces erreurs se traduisent en erreur d'estimation des éclairagements par ciel clair de McClear. La composante d'éclairement la plus sensible à ces erreurs est l'éclairement direct en incidence normale.

La figure 17 représente sur une carte, pour les stations AERONET présentant suffisamment de données, les niveaux de biais d'estimation de McClear sur le DNI induit par les erreurs d'estimation de MACC sur les épaisseurs optiques des aérosols à 550 nm et 1240 nm.

³³ aeronet.gsfc.nasa.gov/

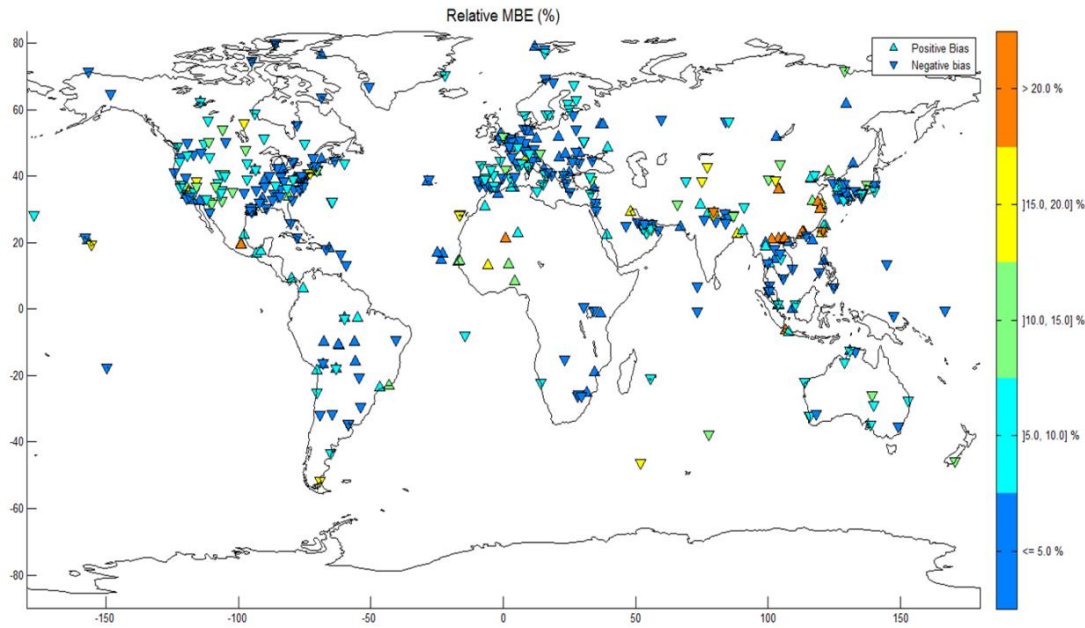


Figure 17 : Estimation sur les sites AERONET des biais d'estimation du DNI par McClear induits par les erreurs de MACC sur les épaisseurs optiques des aérosols à 550 nm et 1240 nm.

Le calcul de la composante diffuse du rayonnement par ciel clair nécessite la connaissance de l'albédo du sol. En effet, une partie de l'éclairement solaire diffus est composée de photons qui ont été réfléchis au moins une fois par le sol et éventuellement par l'atmosphère pour finalement arriver sur la surface considérée. La connaissance globale de cet albédo est fournie par la NASA grâce à l'instrument spatio-porté MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) avec le produit MCD43C1³⁴. Ce produit à 0.05° de résolution spatiale – i.e. 5,6 km à l'équateur – permet de définir tous les 8 jours sur une fenêtre d'analyse de 16 jours trois paramètres (f_{iso} , f_{vol} , f_{geo}) pour calculer l'albédo du sol dans la bande de 0,3 μm à 5 μm à partir de l'angle zénithal solaire. Ces trois paramètres permettent de calculer deux albédos :

- la réflectance hémisphérique directionnelle (*black-sky albedo*) ;
- la réflectance bi-hémisphérique (*white-sky albedo*).

L'albédo du sol est alors une combinaison linéaire de ces deux réflectances dépendant du rapport entre les éclairagements direct et global. L'éclairement global dépendant de l'albédo du sol, la détermination de la composante diffuse et de l'albédo nécessite une résolution conjointe spécifique.

Par ailleurs, compte tenu de la présence inévitable de nuages, le produit MCD43C1 comporte de nombreuses valeurs manquantes. Dans la communication avec actes à la conférence internationale IGARS 2014 ([Blanc et al., 2014](#)) nous avons proposé une solution à chacune de ces difficultés. Ces solutions ont été retenues pour le modèle McClear. Ainsi, la résolution conjointe de l'éclairement diffus et de l'albédo du sol a-t-elle été trouvée.

Il s'agit d'une solution analytique simple qui s'appuie sur les deux hypothèses suivantes :

- L'éclairement global $E(\rho_g)$ pour un albédo du sol ρ_g et un albédo sphérique de l'atmosphère S est le résultat d'une série infinie de réflexions sol-atmosphère de l'éclairement global pour un albédo nul $E(0)$:

$$E(\rho_g) = \frac{E(0)}{1 - \rho_g S} \quad (3)$$

³⁴ gcmd.gsfc.nasa.gov/getdif.htm?MCD43C15

- On peut déterminer l'albédo sphérique de l'atmosphère S à partir du calcul par libRadtran de ce dernier pour deux valeurs distinctes d'albédo du sol ρ_g (ici 0,1 et 0,9), via une relation affine entre S et ρ_g .

Concernant la difficulté soulevée par les nombreuses données manquantes dans les séries temporelles des paramètres d'albédo du produit MCD43C1, après une tentative infructueuse basée sur la troncature de séries de Fourier, la solution retenue a été de définir des moyennes mensuelles multi-annuelles de ces paramètres. Attribués au quinzième jour de chaque mois, les paramètres d'albédo sont calculés pour un jour donné par interpolation linéaire. Sur la période 2004 à 2012, nous avons évalué l'erreur induite par ces moyennes mensuelles multi-annuelles comparée aux séries temporelles à 8 jours de MCD43C1. Avec une erreur quadratique moyenne spatiale et temporelle sur l'albédo de 0,025 variant de 0,01 à 0,035 en fonction de la saison, la perte de précision a été jugée tout à fait acceptable au regard des gains opérationnels apportés par cette approche climatologique : diminution drastique des données manquantes, base de données d'albédo statique de taille réduite facilitant l'interpolation. La figure 18 montre un exemple de cartes complètes du paramètre f_{iso} pour les mois de juillet et de décembre.

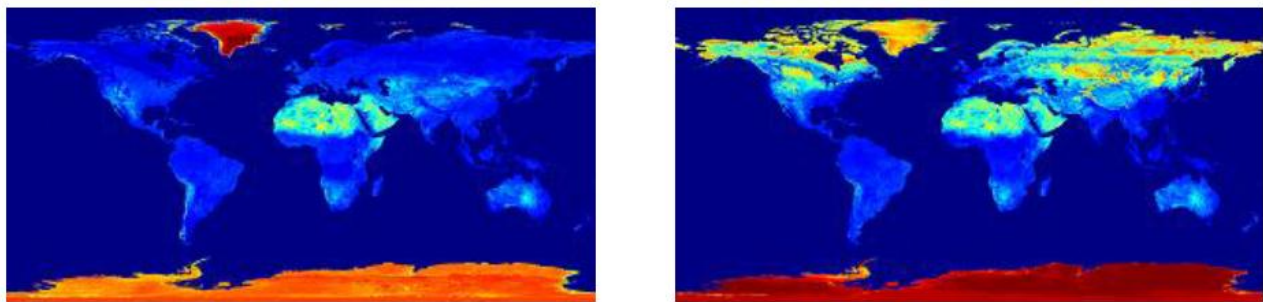


Figure 18 : Exemple de cartes du paramètre f_{iso} correspondant à la composante isotrope de la réflectance bidirectionnelle pour le mois de juillet (à gauche) et le mois de décembre (à droite).

Enfin, le profil atmosphérique est choisi parmi les six profils types AFGL en fonction de la saison de l'instant considéré et de la position géographique du lieu considéré, à partir d'une interprétation de la carte mondiale des climats de Trewartha (1954).

▪ Les actions de validation de McClear

Le modèle McClear a été – et est toujours – l'objet de validations établies sur la base de plusieurs stations de mesures pyranométriques *in-situ* délivrant des mesures intra-horaires des éclairagements global et diffus sur plan horizontal et direct en incidence normale.

La difficulté de ces validations réside d'une part dans l'application drastique de contrôles de qualité des mesures *in-situ* et d'autre part dans la mise en œuvre d'une procédure automatique de sélection de moments de ciel sans nuage. Il est essentiel que cette procédure automatique soit fiable en privilégiant la non-détection par rapport à la fausse détection pour éviter la « contamination » de la présence de nuage dans les statistiques de performance de McClear. Cette méthode doit enfin être aussi acceptée par la communauté scientifique afin de pouvoir évaluer, comparer et publier les performances des différents modèles de calcul d'éclairement par ciel clair.

Dans l'article ([Lefèvre et al., 2013](#)), les mesures de GHI et DNI à la minute de onze stations du réseau BSRN dans le monde entier ont été utilisées sur des périodes temporelles inscrites dans l'intervalle 2005-2008. Ces mesures *in-situ* ont tout d'abord passé une série de tests de contrôle qualité définie par Roesch et al. (2011).

L'algorithme de sélection automatique d'instantanés de ciel sans nuage proposé dans le cadre du projet FP7 MESOR³⁵ a été utilisé. Cet algorithme de détection repose essentiellement sur deux critères :

- un seuil maximal de 30 % de la fraction diffuse définie comme le rapport entre les éclaircissements diffus et global ;
- un seuil maximal de la variabilité temporelle, évaluée sur une période de 3 h encadrant l'instant considéré, de l'indice de clarté modifié. Compte tenu de l'augmentation de l'épaisseur de l'air avec la décroissance de l'angle solaire d'élévation, cet indice, même par ciel clair, a tendance à diminuer en début et fin de journée. Pour compenser cela et obtenir un indice stable notamment par ciel clair, Ineichen et Perez (1999) ont proposé une modification de l'indice de clarté. Cette modification permet d'atténuer fortement, pour des angles solaires d'élévation de moins de 10°, les effets de la position du Soleil sur les indices de clarté.

Sur la base de la comparaison avec les mesures *in-situ* aux instantanés de ciel clair ainsi détectés, le modèle McClear permet une estimation du GHI et du DNI de très bonne qualité, avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,953 (resp. entre 0,964 et 0,989), un biais entre -3 % et +4 % (resp. -7 % et +6%) et une erreur quadratique moyenne entre 3 % et 5 % (resp. entre 7 % et 10 %).

Ces performances d'estimation ont été comparées avec celles de HelioClim3-v3, pour le sous-ensemble de cinq stations dans le champ de vue de MSG. HelioClim3-v3 utilise le modèle ESRA d'éclairement par ciel clair présenté auparavant. McClear offre des performances très nettement supérieures à celles de HelioClim3-v3, avec des erreurs quadratiques moyennes globalement 90 % plus faibles pour le GHI (resp. 125 % plus faible pour le DNI) et des coefficients de corrélation très nettement supérieurs, notamment pour le DNI : en moyenne 0,947 pour HelioClim3-v3 et 0,979 pour McClear.

Les moyennes mensuelles climatologiques de turbidité de l'atmosphère utilisées par HelioClim3-v3 ne représentent pas les variabilités intra-mensuelles et interannuelles de la transparence de l'atmosphère sans nuage. Les améliorations en erreur quadratique moyenne et en corrélation de McClear comparées à HelioClim3-v3 sont le signe du gain très significatif apporté par les données MACC. Notamment, elles permettent des estimations toutes les 3 h des épaisseurs optiques des aérosols et du contenu total en vapeur d'eau, pour une meilleure représentation locale de la variabilité temporelle de la transparence de l'atmosphère.

Nous avons poursuivi les analyses de performances de McClear ([Eissa et al., 2015](#)) dans la région désertique de l'émirat d'Abu Dhabi. Les Emirats Arabes Unis, dont fait partie Abu Dhabi, ont des plans de développements très ambitieux de production électrique par conversion de l'énergie solaire, notamment basés sur des techniques de conversion par concentration : ainsi la centrale solaire thermodynamique SHAMS 1 de type cylindro-parabolique de 100 MWe³⁶, entrée en fonction en 2013, est-elle le premier des trois projets solaires de très grande envergure prévus dans la région. Cependant, cette région désertique présente fréquemment des situations de ciel sans nuage pouvant varier fortement et rapidement entre un ciel bleu très pur à un ciel très turbide du fait de fortes concentrations d'aérosols essentiellement désertiques dans l'atmosphère.

Les mesures sur l'année 2012, contrôlées en qualité, de GHI, DHI et DNI provenant de six stations de type RSI appartenant au Masdar³⁷ et une station pyranométrique au standard BSRN appartenant à *TOTAL New Energies* ont été utilisées pour une analyse statistique.

La procédure de sélection automatique des instantanés de ciel utilisée dans la première étude de validation de McClear ([Lefèvre et al., 2013](#)) s'est révélée inappropriée sur les mesures *in-situ*

³⁵ MESOR (*Management and Exploitation of Solar Radiation*) : www.mesor.org/

³⁶ MWe : notation indiquant la puissance électrique installée.

³⁷ www.masdar.ae/

d'Abu Dhabi. En effet, un seuil de 30 % sur la fraction de diffus exclut de la sélection des instants de ciel sans nuage près de 80 % des mesures valides de jour sur l'année. Cette détection est nettement trop sélective. En plus de ne trouver que 20 % des instants de ciel clair dans une région désertique, la sélection exclue quasiment tous les instants en début et en fin de journée. Ce dernier point soulève donc le problème du manque de représentativité de l'analyse des performances de McClear pour de fortes valeurs de l'angle solaire zénithal.

C'est la raison pour laquelle nous avons eu recours à un autre algorithme de sélection d'instants de ciel clair proposé par Long et Ackerman (2000). Ce dernier dispose d'un certain nombre de paramètres empiriques laissés à l'appréciation de son utilisateur : un réglage particulier et empirique de ces derniers, en contrôlant visuellement les instants sélectionnés, a permis de définir un ensemble plus important de mesures – 37 % des mesures valides de jour – avec surtout une représentation plus importante et satisfaisante des instants en début et fin de journée.

L'analyse des différences sur cet ensemble de mesures sur l'émirat d'Abu Dhabi montre que le modèle McClear permet là aussi une estimation du GHI (resp. du DNI) de bonne qualité, avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,989 (resp. supérieur à 0,911), un biais entre -1 % et +6 % (resp. -8 % et +1 %) et une erreur quadratique moyenne entre 4 % et 8 % (resp. entre 9 % et 13 %). Comme précédemment, McClear surclasse nettement HelioClim-3 ainsi qu'un autre modèle, nommé E-ANN (Eissa *et al.*, 2013), spécifiquement adapté à la région et qui établit, avec des réseaux artificiels de neurones, un lien entre les images SEVIRI de MSG et des mesures *in-situ* d'éclairements incidents au sol.

Contrairement au modèle climatologique mensuel de ciel clair utilisé par HelioClim-3 (version 3 ou 4), McClear rend compte des variabilités tri-horaires – et donc *a fortiori* inter-journalières, inter-mensuelles et interannuelles – des éclairements incidents au sol.

Or, comme le montre la figure 19 pour le site particulier de Madinat Zayed près de la centrale SHAMS-1, on constate, avec McClear, une variabilité interannuelle relativement importante des irradiances mensuelles et annuelles par ciel clair, et plus particulièrement concernant le DNI. Ainsi note-t-on sur la période 2004-2010 une amplitude (MAX-MIN) rapportée à la valeur médiane du DNI mensuel pouvant dépasser 29 % et une amplitude du DNI annuel de plus de 8 %.

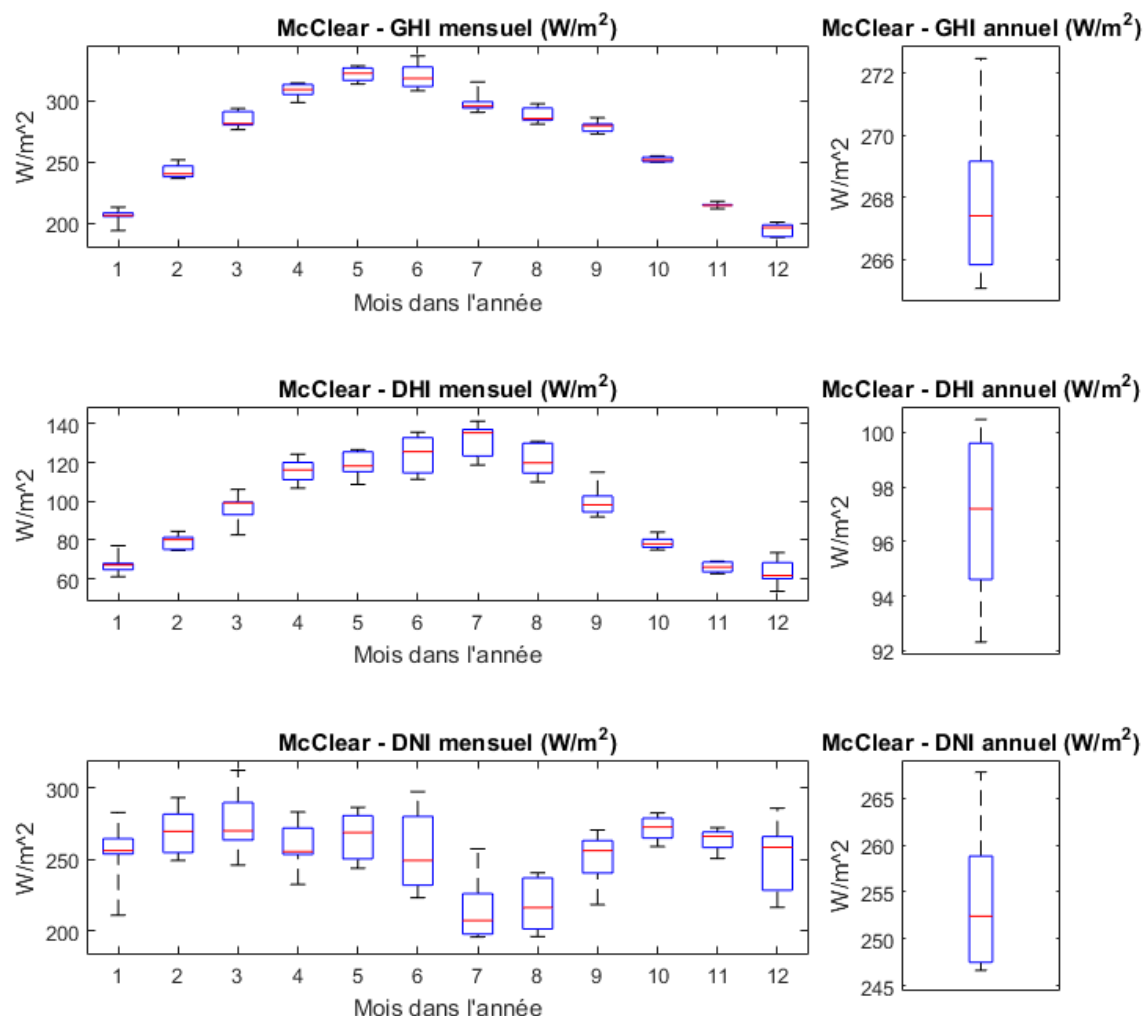


Figure 19 : Boîtes à moustaches (MIN, P25, MED, P75, MAX) mensuelles et annuelles des séries multi-annuelles (2004-2010) des éclairagements en moyenne mensuelle et annuelle par ciel clair GHI, DHI et DNI (McClear).

Toujours pour ce même site, sur l'année 2010 choisie arbitrairement, la figure 20 illustre l'importance de la variabilité intra-mensuelle de la moyenne journalière de l'éclairement DNI – pouvant être supérieure à 100 % – restituée par McClear et « hors de portée » de HelioClim-3 version 3 ou 4.

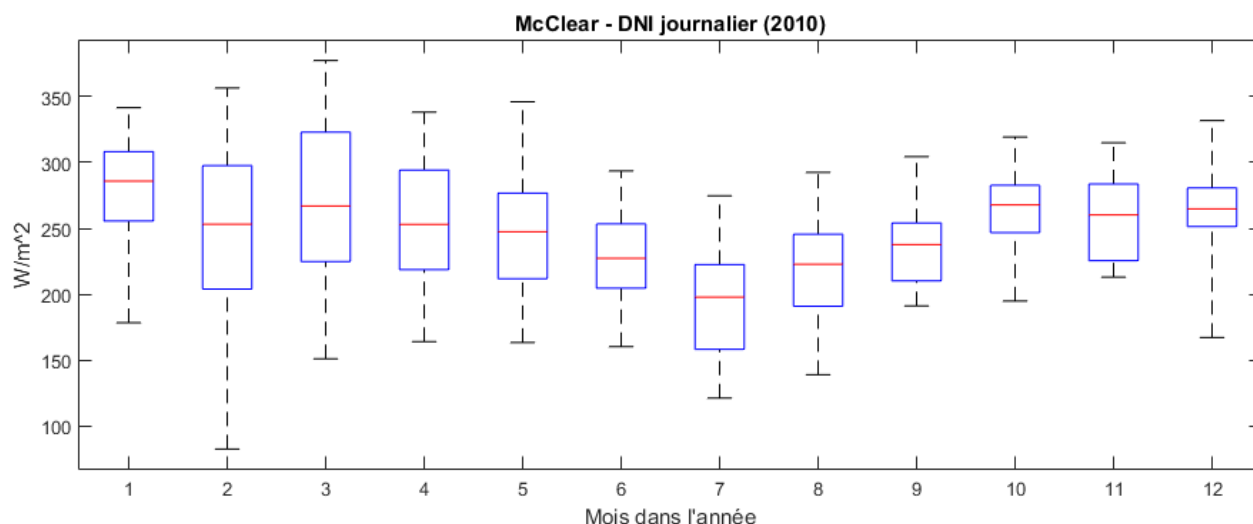


Figure 20 : Boîtes à moustaches (MIN, P25, MED, P75, MAX) mensuelles de la série des moyennes journalières d'éclairement par ciel clair DNI (McClear).

On note cependant que les performances de McClear, notamment pour l'estimation du DNI, sont légèrement en retrait par rapport à celles de la première validation sur les onze stations du réseau BSRN. A l'exception d'une station, on observe une nette sous-estimation du DNI par McClear. Cette sous-estimation est pour grande partie imputable à la sous-estimation de près de 23 % des épaisseurs optiques des aérosols à 550 nm de MACC sur cette région, comparées aux mesures correspondantes du réseau AERONET.

Ce réseau comprend dans la région treize stations fonctionnant, ou ayant fonctionné entre 2004 et 2012. Le niveau de corrélation linéaire entre les estimations de MACC et les mesures des stations AERONET de l'ordre de 0,80 suggère la possibilité de corriger localement ces estimations par un simple facteur multiplicatif de correction.

Cependant cette correction globale cache une disparité locale des erreurs d'estimation des épaisseurs optiques des aérosols, avec un gradient Nord-Sud des écarts. La densité géographique des stations AERONET et leurs couvertures temporelles très disparates et pour la plupart de court terme, n'est hélas pas suffisante, même à l'échelle de l'émirat d'Abu Dhabi, pour envisager une correction locale des épaisseurs optiques des aérosols issues MACC.

Enfin, nous avons mis en évidence lors de la communication à l'ISES ([Oumbe et al., 2013](#)), que dans cette région, la variabilité spatiale des épaisseurs optiques des aérosols pouvait être très importante : ainsi a-t-on estimé sur la base des mesures des stations AERONET, que la variabilité spatiale des épaisseurs optiques des aérosols peut induire des différences de plus de 15 % en erreur quadratique moyenne sur le DNI horaire entre deux lieux espacés de moins de 50 km. Les données MACC étant établies sur une grille de plus de 100 km de résolution, ces variabilités spatiales ne sont pas modélisées et donc ne sont pas restituées par McClear.

Nous poursuivons nos efforts de validation de McClear avec des études en cours, notamment en Australie, en partenariat avec le BoM (*Bureau of Meteorology*), disposant de plus de vingt stations pyranométriques de grande précision mesurant à la minute les éclairagements GHI, DHI et DNI.

2.3.3 McCloud : le modèle des effets des nuages et de l'albédo du sol

L'objectif du modèle McCloud est de rendre compte de l'extinction des éclairagements directs et globaux dues aux nuages : K_c et K_{cb} de l'équation (2).

Comme pour le modèle McClear, nous avons mené une analyse de sensibilité par tirages aléatoires de type Monte Carlo pour identifier les variables les plus importantes pour l'évaluation des effets d'extinction des nuages sur les éclaircissements calculés par McClear en amont.

Ces variables sont les suivantes :

- l'angle solaire zénithal de l'instant considéré (rad) ;
- l'albédo du sol ;
- l'épaisseur optique des nuages ;
- la phase des nuages (gouttelettes d'eau, cristaux de glace) ;
- le contenu en vapeur d'eau des nuages (g/m^3) ;
- la taille du rayon effectif des gouttelettes des nuages (μm).

Cette analyse de sensibilité a permis en outre de mettre en évidence la faible dépendance de l'altitude et de l'épaisseur géométrique des nuages dans l'évaluation de K_c et K_{cb} . Comme pour l'approximation de découplage exprimée par l'équation (2), les écarts induits par les caractéristiques géométriques des nuages sont maximums lorsque l'albédo est très élevé, conjointement à des épaisseurs optiques de nuages très importantes. En tout état de cause, cette dépendance est suffisamment faible pour que nous puissions utiliser des valeurs typiques de la hauteur de la base et l'épaisseur géométrique du nuage plutôt que des valeurs actualisées de ces dernières. Ainsi, avons-nous identifié quatre types de nuages de référence :

- nuage bas : cas d'un nuage de gouttelettes d'eau à basse altitude dont la hauteur de la base est fixée à 1,5 km et l'épaisseur géométrique est 1 km ;
- nuage moyen : cas d'un nuage de gouttelettes d'eau à moyenne altitude dont la hauteur de la base est fixée à 4 km et l'épaisseur à 2 km ;
- nuage haut : cas d'un nuage de gouttelettes d'eau développé verticalement de basse altitude jusqu'à moyenne altitude dont la hauteur de la base est fixée à 2 km et l'épaisseur à 6 km ;
- nuage fin : cas d'un nuage de cristaux de glace avec une hauteur de base de 9 km et une épaisseur géométrique de 0,5 km.

De la même manière, les influences du contenu en vapeur d'eau des nuages (g/m^3) et de la taille du rayon effectif des gouttelettes des nuages (μm) ont été jugées suffisamment faibles pour que des valeurs typiques soient définies en fonction seulement de la phase des nuages : 20 μm et 0,005 g/m^3 pour les nuages de cristaux de glace et 10 μm et 1,0 g/m^3 pour les nuages de gouttelettes d'eau.

▪ Le modèle numérique de McCloud

Pour les mêmes raisons de temps de calcul que pour McClear, McCloud fait appel à des abaques, calculés à l'aide de libRadtran. Il y a quatre abaques distincts pour les quatre types de nuage et les entrées pour chaque abaque sont beaucoup moins nombreuses que pour ceux de McClear : l'angle solaire zénithal, l'albédo du sol et l'épaisseur optique des nuages.

Il en résulte des abaques moins volumineux à calculer puis charger en mémoire pour évaluer K_{cb} et K_c . Conformément à l'hypothèse de découplage, les abaques de McCloud ont été créés en fixant un jeu de paramètres de ciel clair typique constant.

▪ Les données sources pour les entrées des abaques de McCloud

Les données sources pour McCloud sont celles produites par la méthode APOLLO (*AVHRR³⁸ Processing scheme Over cLOUDs, Land and Ocean*) adaptée et mise en œuvre opérationnellement par le DLR sur les images des différents canaux spectraux de SEVIRI sur MSG (Kriebel *et al.*,

³⁸ AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) : instrument spatio-porté sur les satellites polaires POAES (Polar Operational Environmental Satellites)

2003). Cette méthode permet ainsi, toutes les 15 min, de déterminer dans le champ de vue de MSG, pour chacun des pixels :

- un indice en % de la couverture nuageuse ;
- une classification suivant les quatre types de nuage prévus par les abaques de McCloud ;
- l'épaisseur optique des nuages ;

De plus, lorsque la couverture nuageuse est de 100 %, l'algorithme APOLLO fournit :

- une classification plus fine des nuages suivant cinq classes de base (vertical, fin, gouttelette d'eau, multicouche, stratiforme) et leurs éventuelles combinaisons ;
- la température au sommet des nuages.

L'indice de couverture nuageuse est utilisé pour décider de la présence ou non de nuage. S'il y a un nuage au-dessus du lieu considéré à l'instant considéré, le modèle McCloud est exécuté. Dans le cas contraire, seul McClear est mis en œuvre (cf. figure 14).

Si le modèle McClear est applicable au monde entier car ses entrées issues de MACC sont connues de manière globale, la méthode APOLLO est restreinte au champ de vue du satellite Meteosat, ce qui limite actuellement la méthode Heliosat-4 à ce même champ de vue, soit environ un tiers du globe.

Il existe d'autres algorithmes permettant la détermination des caractéristiques des nuages par l'analyse d'images satellitales multispectrales telle que la méthode OCA (*Optimal Cloud Analysis*) proposée par Watts *et al.* (2011). Elle est basée sur des techniques optimales d'inversion, au sens d'un critère d'erreur quadratique, de la résolution – par abaques – des équations de transfert radiatif déterminant les luminances spectrales mesurées par SEVIRI à partir des caractéristiques de l'atmosphère et des nuages. A l'instar d'APOLLO, cette méthode est appliquée par EUMETSAT³⁹, de manière opérationnelle, sur les images issues de l'instrument SEVIRI de MSG.

Nous avons mené des comparaisons entre les produits de caractérisation de nuages APOLLO et OCA à l'aune de la précision des estimations par la méthode Heliosat-4 des éclaircissements incidents au sol comparées aux mesures *in-situ*. En effet, contrairement au modèle McClear, la validation et la précision de McCloud ne peuvent directement être évaluées. En partageant les mêmes estimations des éclaircissements par ciel clair fournies par le modèle McClear, comparer les performances d'estimation des éclaircissements « tout ciel » par la méthode Heliosat-4 permet de révéler l'intérêt relatif des produits de caractérisation de nuages OCA et APOLLO.

En plus d'avoir une utilité directe pour une meilleure connaissance et exploitation de la capacité de la méthode Heliosat-4, cette comparaison est aussi d'intérêt pour la communauté scientifique s'attachant à la caractérisation des nuages et de l'état de l'atmosphère et, en premier chef, pour les équipes d'EUMETSAT et du DLR ayant mis en place respectivement les algorithmes OCA et APOLLO pour SEVIRI. Cette analyse comparative a d'ailleurs fait l'objet d'une communication avec actes en collaboration avec ces équipes lors de la conférence internationale *EUMETSAT Meteorological Satellite* en 2012 ([Qu et al., 2012](#)).

Les estimations des éclaircissements globaux et directs par Heliosat-4/APOLLO et Heliosat-4/OCA ont été comparées pour 23 jours en 2008 à des mesures de quatre stations du réseau BSRN agrégées au pas de 15 min, et concomitantes aux données alors disponibles d'OCA et d'APOLLO.

Il est apparu tout d'abord que, bien que défini à l'origine pour intégrer les données issues d'APOLLO, McCloud se révèle aussi adapté aux données issues d'OCA. Pour les deux produits, les comparaisons statistiques sur les jours testés ont montré des performances satisfaisantes, notamment pour le DNI. Le produit OCA permet d'obtenir des performances en termes d'erreurs

³⁹ navigator.eumetsat.int/discovery/Start/DirectSearch/Extended.do?f%28r0%29=EO:EUM:DAT:MSG:OCA

quadratiques moyennes légèrement meilleures mais aucun des deux ne se détache en termes de biais d'estimation.

Nous avons aussi observé des situations classées « ciel clair » pour OCA mais de nuages fins pour APOLLO, avec une épaisseur optique au niveau minimal de 0,45 par effet de quantification. L'analyse comparée avec les mesures d'éclairement *in-situ* laisse à penser que « la vérité » est entre les deux : une présence effective de nuage de type cirrus avec une épaisseur optique inférieure à 0,45. Nous avons enfin noté pour APOLLO des situations de fausses détections de nuages dans des cas de faible élévation solaire, de température de sol basse et d'albédo élevé que l'on peut trouver en région désertique.

2.3.4 Validation de la méthode Heliosat-4

La validation de la méthode Heliosat-4 ne s'est pas limitée à la comparaison avec les mesures *in-situ* collectées pour la vingtaine de jours en 2008 pour quatre stations du réseau BSRN. Les résultats de Heliosat-4 ont été comparés avec les mesures d'éclairement faites au pas temporel de 1 min. Ces mesures ont subi des contrôles drastiques de qualité puis ont été agrégées à 15 min, dans quatorze stations du réseau BSRN. Chacune de ces stations a acquis au moins une année de mesure – mais souvent plus – entre 2004 et 2010. Ces stations correspondent à plusieurs types de climat : océanique, méditerranéen, désertique et subtropical.

Pour l'éclairement global horizontal, on observe une surestimation entre 4 et 34 W/m², soit entre 1 et 13 % en valeur relative par rapport à la moyenne des mesures correspondantes. A l'exception d'une station au Brésil, les erreurs quadratiques moyennes sont d'environ 90 W/m², soit environ 15 à 20 % pour les stations les plus ensoleillées des climats méditerranéens et désertiques et entre 25 et 46 % pour les autres. Les niveaux de corrélation sont relativement élevés, supérieurs à 0,91. On observe que les performances de Heliosat-4 pour l'estimation de l'éclairement global horizontal sont comparables bien que légèrement moins bonnes que celles de HelioClim-3 dans ses versions 4 ou 5.

Pour l'éclairement direct en incidence normale, le biais entre Heliosat-4 et les mesures est compris entre -89 W/m² et 62 W/m². Les erreurs quadratiques moyennes sont entre 140 W/m² et 240 W/m² en éclairement et entre 26 % et 127 % en relatif. Cette dernière valeur relative très élevée correspond à la station de Lerwick, située à une latitude de plus de 60°N, pour laquelle l'éclairement direct en incidence normale est très faible en valeur moyenne, presque cinq fois inférieur à celui observé à la station de Tamanrasset.

Même si les biais d'estimation de Heliosat-4 sont globalement plus importants que ceux de HelioClim-3 (version 4 et 5), on observe cependant que les niveaux de corrélation de la première, pour la plupart supérieurs à 0,85, sont significativement plus élevés que ceux de la deuxième, de l'ordre de 0,75.

2.3.5 Conclusion

Pour une première version d'application de la méthode Heliosat-4, sans les post-traitements d'amélioration statistiques par étalonnage dont bénéficient par exemple les différentes versions de HelioClim-3, les résultats sont satisfaisants et même encourageants, notamment pour l'estimation de l'éclairement direct.

Ce potentiel d'estimation des éclaircissements solaires incidents au sol sans empirisme, par modélisation physique du transfert radiatif dans l'atmosphère, de manière découplée ciel clair / nuage, montre que nous empruntons une voie qui devrait apporter des solutions aux verrous B et C présentés au début.

On note cependant une grande différence entre les performances de McClear par ciel clair et celles obtenues par Heliosat-4 en « tout ciel ». Une part de cette dégradation est imputable aux problèmes de résolutions spatiales et temporelles des nuages par SEVIRI : la caractérisation des

petits nuages fractionnés et/ou rapidement défilants est fatalement limitée par les résolutions spatiales et temporelles de l'imageur. Même si la mise en œuvre de solutions techniques de type super-résolution est envisageable, ce verrou ne pourra être si ce n'est levé du moins repoussé que par l'avènement d'instruments optiques sur les satellites météorologiques en orbite géostationnaire de meilleures résolutions comme, par exemple, *Meteosat Third Generation* (MTG), HIMAWARI-8 ou encore GOES-R (voir chapitre III).

Cependant, des pistes d'amélioration des estimations des éclaircissements « tout ciel » ont été identifiées, portant essentiellement sur une meilleure détection des nuages, une meilleure estimation de leur épaisseur optique et une meilleure modélisation des nuages de type cumulonimbus de grande extension verticale.

▪ La dissémination de la base de données McClear et MACC-RAD issues de Heliosat-4

Grâce au support des projets MACC, MACC-II et MACC-III, les modèle McClear et MACC-RAD sont disponibles gratuitement – moyennant inscription – sur le site www.soda-pro.com (voir la figure 21). Des applications Web, de type WPS (*Web Processing Service*), sont également disponibles pour permettre une automatisation des requêtes par les utilisateurs, de « machine à machine ».

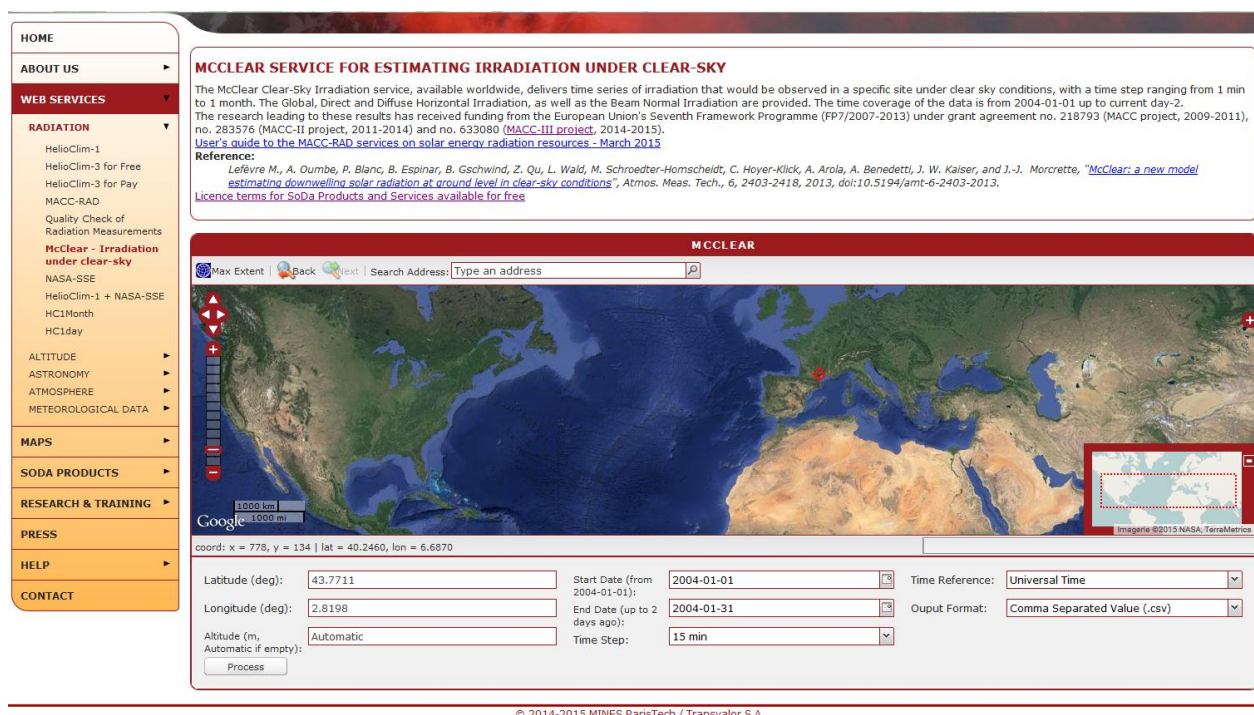


Figure 21 : Interface pour des requêtes de McClear sur le site www.soda-pro.com.

La base de données HelioClim-3 dans sa version 5 profite des avancées très significatives du modèle McClear comparé au modèle ESRA alimenté par la base de données climatologiques du trouble de Linke mensuel utilisé par les versions précédentes.

L'atlas solaire pour la Méditerranée Solar Med Atlas⁴⁰, à 1 km de résolution, est le premier atlas qui a bénéficié des améliorations apportées par McClear. Ces améliorations sont essentielles, notamment en Afrique du Nord, pour une meilleure représentativité des estimations des irradiances mensuelles GHI, DHI et DNI fournies par les différentes cartes de l'atlas.

⁴⁰ www.solar-med-atlas.org

2.4 Instrumentation *in-situ*

Afin de contrôler la qualité des estimations notamment faites par les deux méthodes Heliosat présentées précédemment et donc la qualité des bases de données de rayonnement solaire (HelioClim-3, MACC-RAD et McClear), un effort est porté sur la collecte et l'analyse régulières des valeurs de rayonnement mesurées issues des divers réseaux de stations pyranométriques (verrou D). Pour cela, j'ai participé activement aux développements de modèles spécifiques de contrôle de qualité, d'analyse, de validation, de complétion et de ré-échantillonnage de ces mesures *in-situ*.

En particulier, nous avons développé une méthode innovante pour améliorer la qualité du sur-échantillonnage par interpolation d'une série temporelle d'irradiation solaire. Cette amélioration est basée sur le respect de la propriété de consistance de l'interpolation. Cela signifie que la réagrégation de la série temporelle interpolée doit être égale à la série temporelle d'origine. L'algorithme d'interpolation proposée se déroule ainsi : on procède au sur-échantillonnage par interpolation linéaire de l'indice de clarté ; cette série temporelle d'indices de clarté sur-échantillonnés est alors multipliée par l'irradiation hors atmosphère correspondante. En l'état, le résultat de cette interpolation ne respecte pas la propriété de consistance énoncée précédemment. Une modification basée sur des considérations d'algèbre linéaire est alors apportée à cette série pour corriger l'erreur de consistance. Cette correction peut être faite de manière itérative par l'utilisation de l'algorithme de projection sur des ensembles convexes (POCS, *Projection On Convex Sets*) de façon à assurer que la série temporelle résultante n'ait pas de valeurs négatives ou de valeurs dépassant un certain seuil proportionnel à l'irradiation hors atmosphère. Une communication sans actes ([Blanc et Wald, 2010](#)) a été faite sur cette méthode lors du 10^{ième} congrès international *European Meteorological Society* à Vienne.

En 2012, dans le cadre l'action WIRE⁴¹ (*Weather Intelligence for Renewable Energy*) du programme de coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique du programme européen COST (*COoperation in Science and Technology*) (cf. section IV-4.1), j'ai rejoint un groupe d'experts internationaux s'intéressant à la qualité de la mesure *in-situ*, notamment du rayonnement direct en incidence normale.

Dans ce cadre, et en collaboration avec la tâche SHC-46 (cf. section IV-4.1), ma première démarche a été de susciter et d'animer deux séminaires portant sur les diverses définitions de l'éclairement direct en incidence normale utilisées en métrologie, en science atmosphérique et en énergie solaire, leur harmonisation et leurs expressions mathématiques. Ces séminaires ont donné naissance à un article ([Blanc et al., 2014](#)) qui propose une série de définitions faisant d'une part consensus sur l'éclairement direct en incidence normale et d'autre part mettant en évidence l'importance du rayonnement circumsolaire, notamment lors de la présence d'une importante concentration en aérosols ou de nuages fins de cristaux de glace. Ce travail sur les définitions relatives à l'éclairement direct en incidence normale a en outre fait l'objet de la première partie ([Blanc, 2013](#)) du séminaire en ligne (*webinar*) « *Improving DNI information for CSP development* » organisé par l'ISES (*International Solar Energy Society*) ([Blanc, 2013](#)) et la tâche SHC-46 ainsi que d'une communication sans actes au congrès international ICEM en 2013 ([Espinar et al., 2013](#)).

Toujours dans le cadre du programme COST WIRE, j'ai intégré un groupe d'experts, conduit par MeteoSwiss⁴², étudiant des moyens de mesure de l'éclairement direct en incidence normale alternatifs au pyrhéliomètre, nettement moins chers à l'achat, plus robustes et nécessitant moins de maintenance.

⁴¹ wire1002.ch

⁴² www.meteoswiss.admin.ch

Ces moyens de mesure sont de deux types :

- Le RSI (figure 22a) : cet instrument, déjà brièvement présenté dans la section I-2.2.1, est composé d'une photopile mesurant, modulo un étalonnage empirique spécifique, l'éclairement global horizontal. A intervalles réguliers, un système d'ombrage rotatif vient masquer la photopile. L'éclairement diffus horizontal est déterminé en détectant le passage au minimum de l'éclairement mesuré par la photopile lors de la rotation de la bande d'ombrage. L'éclairement direct en incidence normale est alors calculé en divisant la différence entre les éclairements sur plan horizontal global et diffus puis en divisant par le cosinus de l'angle zénithal solaire.
- Le SPN1 (figure 22b) : cet instrument faisant l'objet d'un brevet (Wood, 1999) est composé de sept thermopiles et d'un masque d'ombrage fixe spécifique qui permet d'estimer à chaque instant la mesure des éclairements global et direct sur plan horizontal. Là encore l'éclairement direct en incidence normale n'est pas mesuré mais calculé à partir des composantes globale et diffuse et de l'angle zénithal solaire.

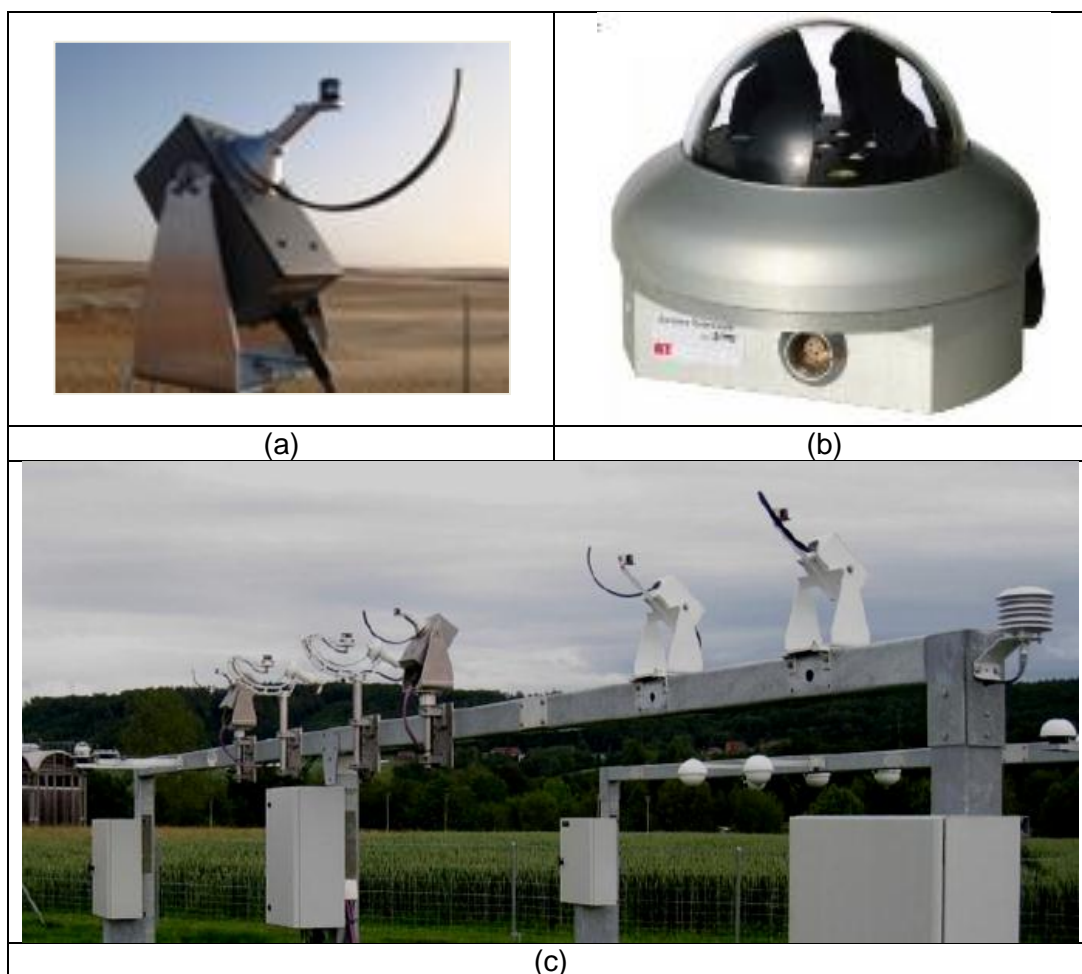


Figure 22 : Exemple d'un RSI (a) de la société CSP Service et d'un SPN1 (b) de la société Delta-T Devices Ltd. (c) Ensemble des instruments de mesures alternatifs testés lors de la campagne d'inter-comparaison menée sur le site BSRN de MétéoSwiss.

L'objectif de ce groupe d'experts était de mener à bien une comparaison de plusieurs de ces instruments provenant de manufacturiers différents et de comparer leurs mesures pyranométriques (GHI, DHI et DNI) avec celles fournies par les instruments de référence du réseau BSRN opérés et maintenus par MétéoSwiss sur leur site de Payerne (Suisse). La campagne de mesure a duré plus de 450 jours entre juin 2012 et septembre 2013. Neuf

instruments ont été testés : six instruments de type RSI provenant, par couple, de trois fabricants différents et trois SPN1 (cf. figure 22).

La figure 23 ci-dessous présente un exemple de résultat de ces inter-comparaisons sous forme d'un diagramme « cible » proposé par Jolliff *et al.* (2009). Un point dans ce diagramme représente plusieurs critères statistiques de comparaison :

- La valeur absolue de l'abscisse de ce point représente l'écart type de la différence entre les mesures de l'instrument testé et de l'instrument de référence ;
- Le signe de l'abscisse indique si l'écart type des mesures de l'instrument de test est supérieur (signe positif) ou inférieur (signe négatif) à l'écart type des mesures de l'instrument de référence ;
- L'ordonnée représente le biais signé des mesures de l'instrument de test comparées aux mesures de l'instrument de référence ;
- La distance du point au centre du diagramme représente l'erreur quadratique moyenne.

On note dans ce diagramme que les trois instruments SPN1 se distinguent notamment par une très forte surestimation, de plus de 25 W/m², de leurs mesures de l'éclairement direct en incidence normale quand les autres instruments présentent globalement des sous-estimations de moins de 6 W/m². Les écarts types de différences de mesures sont aussi plus importants pour les instruments SPN1 : ils sont de l'ordre de 30 W/m² pour ces derniers et de moins 20 W/m² pour les autres instruments.

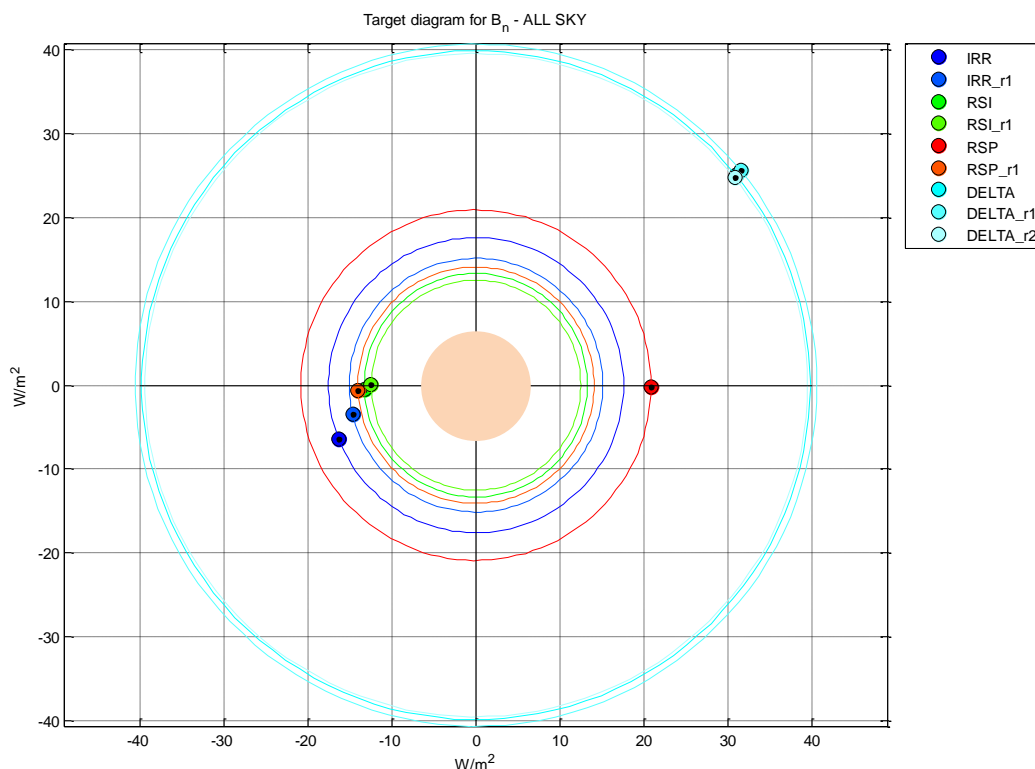


Figure 23 : Exemple de diagramme cible présentant les résultats d'inter-comparaisons pour l'éclairement direct en incidence normale (IRR et IRR_r1 : RSI de la société américaine *Irradiance Inc.*, RSI et RSI_r1 : RSI de la société allemande *Reichert GmbH*, RSP et RSP_r1 : RSI de la société allemande *CSP Services GmbH*, DELTA, DELTA_r1, DELTA_r2 : SPN1 de la société anglaise *Delta-T Devices Ltd*).

L'analyse et la quantification précise des sources d'incertitudes des instruments de mesures pyranométriques de référence du site BSRN à Payerne a fait l'objet d'une publication dans la revue *Journal of Geophysical Research: Atmosphere* (Vuilleumier *et al.*, 2014). Le disque orange

au centre du diagramme de la figure 23 représente l'incertitude estimée des instruments de référence.

Un deuxième article dans la revue *Atmospheric Measurement Techniques* ([Badosa et al., 2014](#)) traite plus particulièrement des sources d'incertitude de l'instrument particulier SPN1 et notamment de sa propension à nettement surestimer l'éclairement direct en incidence normale comme le montre la figure 23. Cette surestimation est très majoritairement liée à l'angle effectif d'ouverture du SPN1 qui varie entre 5° et 25° en fonction de la position du Soleil. Cet exemple particulier de l'instrument SPN1 souligne l'importance de la définition de l'angle d'ouverture et du rayonnement circumsolaire associés à la mesure de l'éclairement direct en incidence normale que nous avons mis en avant dans l'article sur la définition du DNI ([Blanc et al., 2014](#)).

Enfin, une dernière publication qui présentera les résultats de l'inter-comparaison est en cours d'élaboration et sera soumise avant la fin de l'année 2015.

Toujours dans le cadre de mesures *in-situ* en lien avec le rayonnement solaire, j'ai pu mettre en place depuis 2011 des actions de recherche avec EDF R&D sur l'utilisation de caméras hémisphériques filmant le ciel, dans le but de faire, *in fine*, de la prévision locale à très court terme de l'éclairement solaire.

Ces actions de recherche ont, dans les deux cas, pris la forme de contrat de recherche adossé à un stage de fin d'étude de l'école d'ingénieurs Grenoble-INP (cf. section IV-5.3) :

- Gauchet, C. 2011. Traitement d'image Fish-Eye au sol pour la prévision de la production photovoltaïque (6 mois) ;
- Buchholtzer, J., 2013. Reconstruction 3D du ciel pour la prévision de production photovoltaïque. (6 mois).

Avant 2011, dans les différents centres internationaux de recherche sur le rayonnement solaire, les images hémisphériques du ciel étaient majoritairement acquises par le moyen d'une caméra spécifique, le *Total Sky Imager* (TSI). Cette caméra, munie d'un capteur CCD RGB de 640x480 pixels et orientée vers le bas, acquiert des images du reflet du ciel sur un miroir sphérique. Le miroir est muni d'une bande non-réfléchissante noire en rotation pour masquer continuellement le reflet du Soleil. Il s'agit d'un instrument relativement complexe avec un système mécanique automatique de rotation en phase avec les déplacements apparents du Soleil, cher à l'achat et peu robuste à l'utilisation. EDF R&D souhaitait à l'époque tester l'utilisation de caméras hémisphériques bon marché, normalement dédiées à la vidéo-surveillance, sans système d'occultation du Soleil. Cette caméra permettait l'acquisition toutes les 30 s d'une image hémisphérique du ciel en RGB, avec une résolution de 1200x1600 pixels.

La première action, en 2011, a consisté tout d'abord à établir un lien entre des images d'une caméra hémisphérique et des mesures pyranométriques concomitantes du même lieu. Pour établir cette relation, nous avons utilisé des séries temporelles d'images hémisphériques du ciel et de mesures d'éclairements solaires globaux et diffus sur plan horizontal et direct en incidence normale d'une station pyranométrique de très grande qualité installée par EDF R&D et le CEREAL, laboratoire commun Ecole des Ponts ParisTech et EDF R&D, sur un site dans le Nord-Est de l'île de la Réunion.

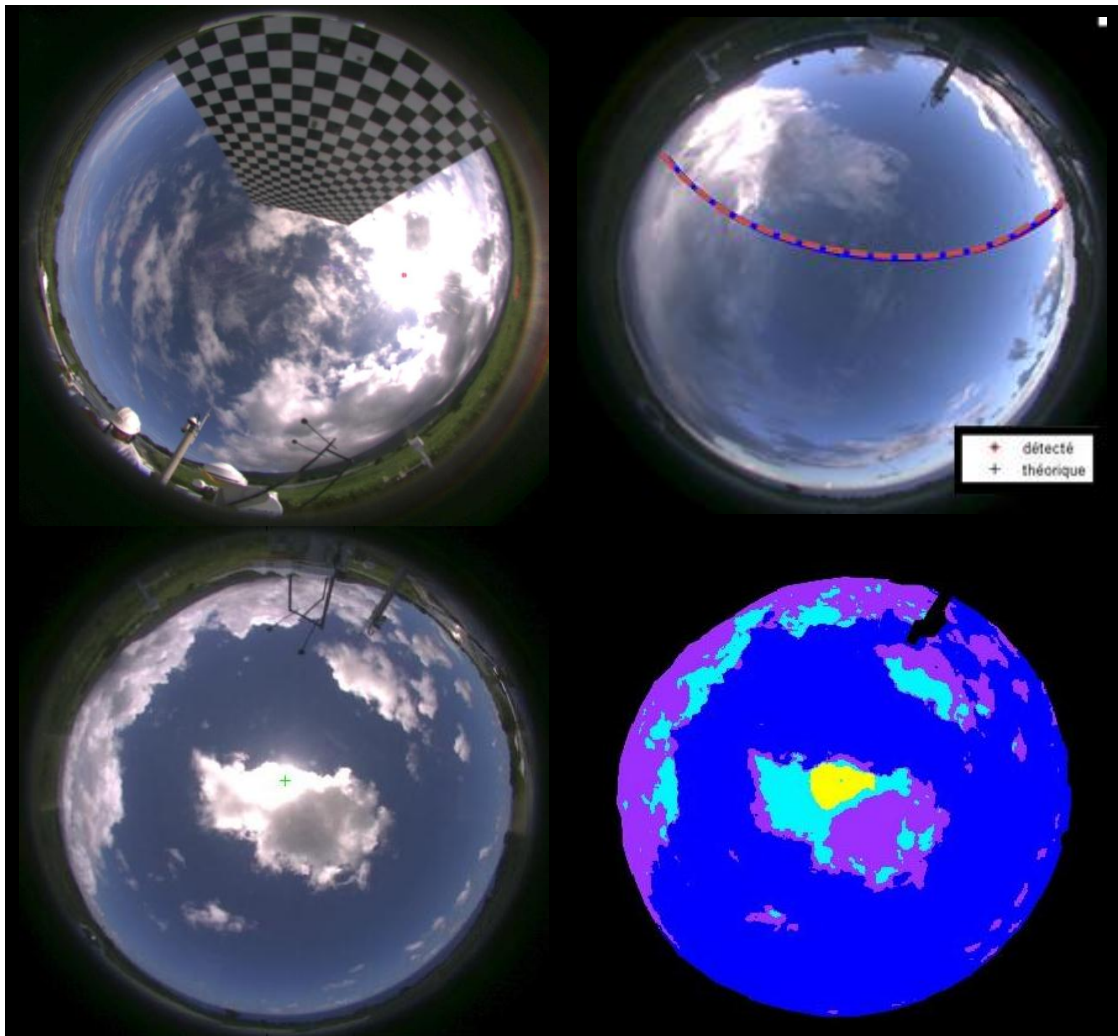


Figure 24 : (a) Exemple de damier utilisé pour l'étalonnage intrinsèque de la caméra. (b) Exemple de superposition de la position théorique (en rouge) et détectée (en bleu) du centre du Soleil lors de l'étalonnage extrinsèque. (c) Exemple d'une image hémisphérique du ciel. (d) Résultat de la classification des pixels de l'image (c) : en bleu les pixels de ciel clair, en magenta les pixels de nuages sombres, en cyan les pixels de nuages clairs et en jaune les pixels non occultés de la zone circumsolaire (les pixels non occultés du disque solaire ne sont pas détectés dans l'exemple).

a	b
c	d

Une première étape d'étalonnage géométrique de la caméra hémisphérique a été mise en place. L'étalonnage intrinsèque de la caméra, consistant notamment à déterminer finement la focale, le centrage du plan focal ou encore la déformation optique, a été effectué en ayant recours aux méthodes d'étalonnage proposés par Scaramuzza *et al.* (2006) utilisant de multiples images d'un damier présenté sous plusieurs angles (*cf.* figure 24a). Ces étalonnages permettent alors de déterminer les fonctions de localisation directe et inverse. La fonction de localisation directe permet de déterminer la droite de visée dans le repère terrestre d'un pixel quelconque de l'image. La fonction de localisation inverse, quant à elle, permet de déterminer la position du pixel d'un point localisé dans le repère terrestre.

Une fois l'étalonnage intrinsèque déterminé, nous avons proposé une méthode innovante pour déterminer automatiquement et très précisément – au dixième de degré près – les angles d'orientation de la caméra dans le repère topocentrique « Est-Nord-Haut » (étalonnage extrinsèque). Cette méthode consiste à repérer dans différentes séries d'images de ciel clair la position du pixel correspondant au centre du Soleil puis à déterminer, par optimisation non-linéaire au sens des moindres carrés, les angles d'Euler de la caméra – roulis, tangage, lacet – qui font

correspondre au mieux, à chaque instant, les positions angulaires des pixels détectés avec celles déterminées par *Solar Geometry 2*. La figure 24b montre un exemple, pour une journée, de superposition, après optimisation, des trajectoires détectée et théorique du centre du Soleil.

Une deuxième étape a consisté à déterminer un algorithme de classification des images hémisphériques de façon à distinguer cinq classes de pixels : (1) pixel de ciel clair, (2) pixel de nuage clair, (3) pixel de nuage foncé, (4) pixel non occulté dans le disque solaire. Par rapport aux algorithmes existants de segmentation des images hémisphériques du ciel basés sur des seuillages du rapport des canaux R sur G ou R sur B, cette segmentation est originale car les seuils portent sur la luminance $L = 0,2126 R + 0,7152 G + 0,0722 B$ et la différence B-R. De plus, ces seuils ne sont pas constants dans l'image et sont définis sur cinq zones spécifiques de l'image : le disque solaire, deux zones circumsolaires plus ou moins étendues, la zone intermédiaire et l'horizon hors orographie. Comparée à de nombreux échantillons de classification faite par des opérateurs humains sur plus de 1000 cas, cette classification est performante avec plus de 86 % de bonne classification suivant les cinq classes et plus de 92 % de bonne classification suivant les deux sous-classes simplifiées ciel clair / nuage. La figure 24d montre un exemple de classification obtenue à partir de l'image hémisphérique du ciel présentée par la figure 24c.

Enfin, nous avons établi une régression linéaire entre le résultat de cette classification et les indices de ciel clair K_c et K_{cb} définis comme les rapports entre les éclairagements respectivement globaux et directs sur plan horizontal par les éclairagements correspondant par ciel clair. Dans ce cas, nous avons utilisé le modèle ESRA comme modèle d'éclairement par ciel clair. Comparées aux mesures in-situ, les estimations au pas de 15 min des éclairagements globaux sur plan horizontal et directs en incidence normale ont une bonne précision avec des erreurs quadratiques moyennes de moins de 20 % (12 % pour l'estimation de l'éclairement global horizontal) et des coefficients de corrélation de plus de 0,97. Il est donc possible d'établir une fonction de transposition simple et relativement précise entre les images segmentées de la caméra hémisphérique et les mesures pyranométriques au même moment.

Cette étude a fait l'objet d'une communication avec actes ([Gauchet et al., 2012](#)) lors du séminaire international « *Remote Sensing Measurements for Renewable Energy* » organisé en mai 2012 dans le cadre du programme COST WIRE. Il a contribué à l'émergence de l'utilisation de caméras hémisphériques bon marché pour l'étude et la prévision du rayonnement solaire incident au sol, en remplacement des TSI alors considérés comme le standard.

En 2013, cette étude avec EDF R&D sur les caméras hémisphériques de l'île de la Réunion s'est prolongée sur la capacité de deux caméras hémisphériques distantes de 600 m à reconstruire, par stéréoscopie, la position en trois dimensions des nuages détectés. La figure 25 montre un exemple de deux images hémisphériques du ciel au même instant provenant de ces deux caméras.



Figure 25 : Exemple de deux images concomitantes (a, b) provenant de deux caméras hémisphériques distantes de 600 m sur le site de mesure de EDF R&D / CEREa dans le Nord-Est de l'Île de la Réunion.

Le premier objectif de cette étude était de mettre en œuvre des techniques de photogrammétrie stéréoscopique adaptées pour estimer la hauteur et la position des nuages.

Plusieurs difficultés étaient identifiées :

- La forte « autosimilarité » des nuages qui peut induire des confusions dans la détermination des points « homologues » ;
- Les différences d'angle de vue des deux caméras qui peuvent induire des différences notables d'aspects des nuages ;
- La qualité des images qui est dégradée par la compression JPEG et les phénomènes locaux de saturation des pixels ;
- Le problème de synchronisation entre les prises de vue des deux caméras qui peuvent induire des déformations dans l'aspect apparent des nuages ;
- La complexité de la scène en trois dimensions avec des mouvements complexes de nuages sur plusieurs niveaux d'altitude avec des déformations, apparitions et disparitions.

En premier lieu, nous avons établi le plus précisément possible les étalonnages géométriques intrinsèque et extrinsèque des deux caméras hémisphériques en suivant la méthode proposée par [Gauchet et al. \(2012\)](#).

Nous avons choisi comme mesure de similarité la corrélation centrée normée qui est classiquement utilisée pour la reconstruction en trois dimensions à partir de couples stéréoscopiques d'images satellitaires optiques à haute résolution. Un point d'intérêt dans une des deux images est ainsi repéré et localisé précisément par son point homologue dans l'autre image, en maximisant la corrélation centrée normée établie sur une vignette centrée sur le point d'intérêt, appelée vignette de contexte. La connaissance des fonctions de localisation directe et inverse établies lors des étalonnages géométriques des caméras permet alors de déterminer la position en trois dimensions du point considéré.

Une première étape a consisté tout d'abord à présélectionner dans une des deux images des pixels qui ont été d'une part préalablement classifiés comme « pixels de nuage » par la classification proposée par [Gauchet et al. \(2012\)](#) et, d'autre part, qui présentent un niveau de contraste propice à la mesure de similarité. Reprenant des résultats de ma thèse ([Blanc, 1999](#)), nous avons choisi comme critère de contraste favorable la norme L2 du gradient local sur la

vignette de contexte : en effet, la borne de Cramér-Rao de l'estimateur de disparité est inversement proportionnelle à cette norme L2 du gradient local.

Afin de minimiser autant que possible les risques d'ambiguïté d'appariement liés à l'autosimilarité des nuages, nous avons cherché à limiter l'espace de recherche des points homologues de ces points d'intérêt présélectionnés. En utilisant les fonctions de localisation directes et inverses des deux caméras, nous avons choisi de contraindre la recherche uniquement en une dimension en utilisant la géométrie épipolaire. Cette approche présente aussi l'intérêt de limiter le temps de calcul en limitant le nombre de corrélations centrées normées à évaluer.

Le site d'EDF R&D / CEREa ne disposant pas de ceilomètre – ou télémètre de nuages –, nous n'avons hélas pas pu procéder à une évaluation de la qualité des estimations de hauteurs des nuages par stéréoscopie. Nous en avons cependant vérifié la plausibilité vis-à-vis des hauteurs typiques pour trois classes de nuages (*cirrus*, *altocumulus* et *cumulus*), comme le montre le tableau 3.


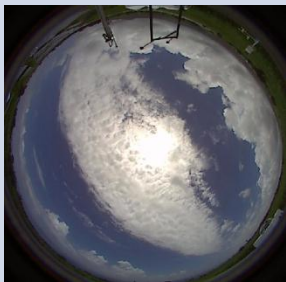
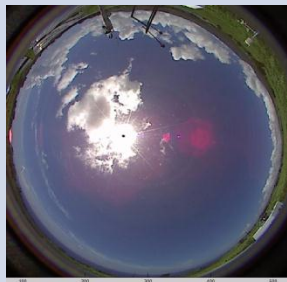
Types de nuage	<i>Cirrus</i>	<i>Altocumulus</i>	<i>Cumulus</i>
Images considérées			
Altitude typique	[6 km – 12 km]	[1 500m – 4.5 km]	[300 m - 2 km]
Altitude estimée	11 500 m	1 500 m	800 m

Tableau 3 : Vérification de cohérence des altitudes estimées de trois types de nuages (*cirrus*, *altocumulus* et *cumulus*) par comparaison avec leurs gammes d'altitude typique.

Nous avons cependant constaté que les estimations des hauteurs d'un même nuage peuvent être très variables d'une prise de vue à l'autre, même à 30 s d'intervalle, avec des écarts brusques d'estimation pouvant atteindre 100 m à 300 m. Cette variabilité d'altitude est imputable à du bruit d'estimation stéréoscopique compte tenu de la qualité des images et de la nature peu contrastée et autosimilaire des nuages.

Pour améliorer la précision de ces estimations, nous avons choisi de recourir au filtrage de Kalman par nuage détecté. Le schéma de principe est présenté figure 26.

Un nuage détecté est défini comme une composante connexe dans la classification des nuages effectuée à chaque nouvelle image. Chaque nuage ainsi détecté est associé à un vecteur d'état et un filtrage de Kalman propre. Leurs vecteurs d'état sont composés de la position et de la vitesse 3D de leurs centroïdes. Chacun de ces nuages est alors apparié avec les nuages détectés à l'instant précédent par minimisation des distances croisées de Hausdorff calculées sur la forme de leur composante connexe. En cas d'appariement, le nuage « hérite » du filtrage de Kalman et du vecteur d'état précédent. Dans le cas contraire, il s'agit de la création d'un nuage se voyant attribuer un nouveau filtre de Kalman et un nouveau vecteur d'état.

L'étape de photogrammétrie stéréoscopique permet d'estimer, à l'intérieur de chacun de ces nuages, la position en trois dimensions de certains points suffisamment contrastés, essentiellement situés sur les contours. Ces points sont alors moyennés par nuage pour

déterminer la position de leur centroïde. Si nécessaire, un nuage peut être, à ce stade, subdivisé en plusieurs nuages si l'amplitude des altitudes estimées est trop importante : chacun de ces nouveaux nuages se voit alors attribuer une duplication du filtre de Kalman et de son vecteur d'état.

Une estimation par une technique de flot optique (Lucas et Kanade, 1981) appliquée sur deux images consécutives d'une des deux caméras permet l'estimation de vecteurs de déplacements 2D apparents dans l'image eux aussi moyennés par nuage détecté puis transformés en vecteur de déplacements 3D via la fonction de localisation inverse.

Le vecteur d'observation du filtre de Kalman d'un nuage est ainsi constitué de la position et la vitesse 3D du son centroïde estimées par photogrammétrie stéréoscopique d'une part et par flot optique d'autre part. Le filtre de Kalman permet alors de manière récursive d'assimiler ce vecteur d'observation pour en dériver une estimation filtrée et débruitée de son vecteur d'état. En outre, pour chaque nuage détecté, le filtrage de Kalman permet la prévision de son vecteur d'état et de l'incertitude associée pour l'instant suivant. Cette information est utilisée pour restreindre encore la zone de recherche lors de l'étape suivante de photogrammétrie stéréoscopique réduisant d'autant les possibilités d'erreur ou d'ambiguïté lors des appariements.

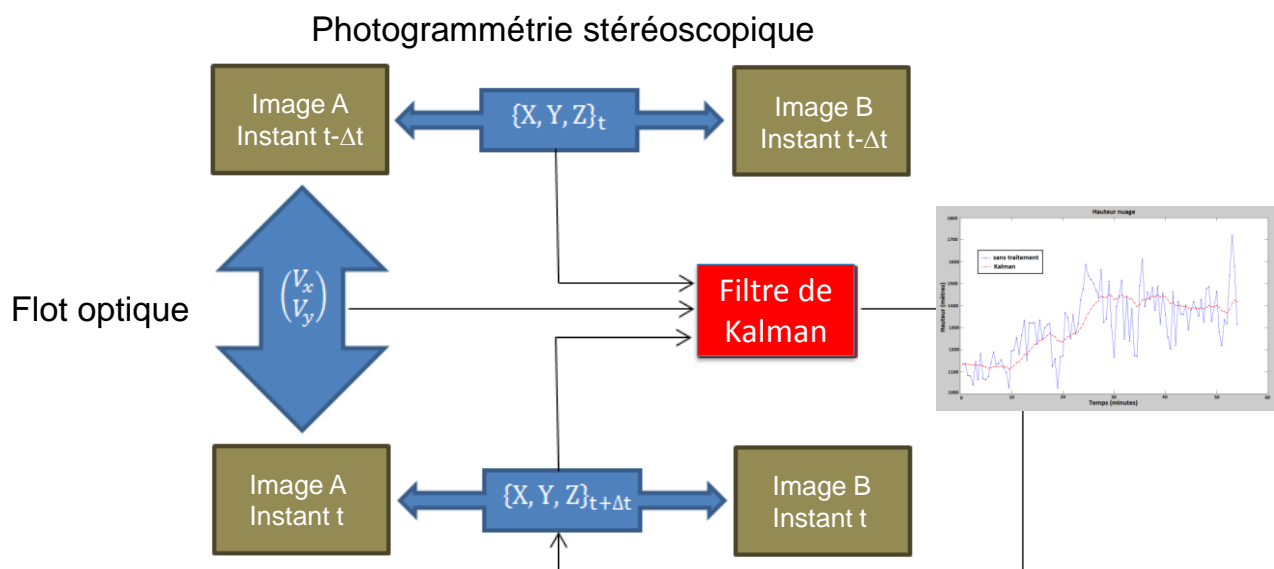


Figure 26 : Schéma de principe du filtrage de Kalman pour l'estimation de la position 3D des nuages.

Ce principe innovant et prometteur de l'assimilation par filtrage de Kalman des mesures de position et de vitesse de nuages par photogrammétrie stéréoscopique et flot optique a été présenté sur la forme d'une communication sans actes lors du séminaire « *International workshop on sky camera* » organisé dans le cadre de COST WIRE ([Buchholtzer et al., 2014](#)).

Nous avons pu donner suite à ces actions de recherche sur la reconstruction 3D des nuages dans le cadre du projet FP7 DNICast (2013-2016) dont un des objectifs dont nous avons la responsabilité est l'utilisation de plusieurs caméras hémisphériques en mode stéréoscopique pour la prévision à très court de cartes spatialement résolues (10 m) de l'éclairement direct en incidence normale. Cette activité est décrite plus en détail dans le chapitre III.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, j'ai présenté différentes activités de recherche que j'ai menées ou à auxquelles j'ai contribuées. Ces activités avaient pour objectif de lever, au moins partiellement, les quatre verrous principaux énoncés au début :

- Verrou A : la limitation en résolution spatiale et temporelle des estimations du rayonnement solaire par imagerie satellitale ;
- Verrou B : les incertitudes inhérentes à la modélisation de type « indice d'ennuagement » comme Heliosat-2 ;
- Verrou C : la limitation de la caractérisation du rayonnement solaire incident ;
- Verrou D : les difficultés d'utilisation de l'instrumentation in-situ.

Ces activités de recherche ont donné lieu à 20 articles dans des revues internationales à comité de lecture, 3 ouvrages scientifiques collectifs, 1 brevet et une cinquantaine de communications dans des conférences internationales (sous-ensemble des publications listées dans la section IV-2).

En plus de cette dissémination académique, le résultat de ces recherches ont donné lieu à de la dissémination vers la sphère économique et sociétale qui est décrite dans le prochain chapitre II. Le chapitre III propose, quant à lui, de décrire les perspectives que j'entrevois à court et moyen termes à ces activités de recherche.

CHAPITRE II - DISSEMINATION ET IMPACTS SOCIETAUX





L'objet de ce chapitre est de donner un aperçu de cette dissémination – et de ses éventuels impacts – en direction non seulement de la communauté scientifique mais aussi des décideurs publics et des entités – bureaux d'expertise et de consultance, PME, grandes entreprises, etc. – portant, accompagnant ou décidant le développement de projets de production d'énergie par conversion du rayonnement solaire.

1. DISSEMINATION DES DONNEES DE RAYONNEMENT SOLAIRE VIA DES SERVICES WEB

C'est une volonté affirmée du centre O.I.E. de mettre à disposition le produit de ses recherches, via des services web interopérables s'appuyant sur des standards ouverts, notamment promulgués par l'*Open Geospatial Consortium* (OGC), l'organisation internationale de normalisation (ISO, *International Organization for Standardization*) et le *World Wide Web Consortium* (W3C). En 2008, une infrastructure de données spatiales (IDS) a été créée pour intégrer ces différents services – services permettant notamment l'accès à des séries temporelles via des *Web Processing Services* (WPS), services de cartes (images ou vectorielles) via des *Web Map Services* (WMS) ou *Web Covering Services* (WCS) – et offrir des services de catalogages associés via des *Catalogue Services for the Web* (CSW). Cet IDS est accessible à l'adresse suivante : www.webservice-energy.org.

C'est ainsi que la majorité des activités de recherches du centre auxquelles j'ai pris part sur l'estimation du rayonnement solaire ont donné lieu à des actions de dissémination, au-delà de la dissémination « académique » sous formes de communications ou d'articles scientifiques.

Les différentes bases de données sur le rayonnement solaire auxquelles j'ai contribué font l'objet de services web. Le tableau ci-dessous propose une liste de ces services qui sont recensés sur le catalogue au standard CSW geocatalog.webservice-energy.org.

HelioClim-3 	<p><i>Ensemble de bases de données de rayonnement solaire établies à partir de la méthode Heliosat-2 appliquée sur les images des canaux visibles du capteur SEVIRI de MSG (versions actuelles recommandées : v4 et v5).</i></p> <p>Services WPS de séries temporelles d'irradiation</p> <p>Clients sur www.soda-pro.com</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-3-for-free Années 2004-2005 Couverture $\pm 60^\circ$ en latitude / longitude ▪ www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-3-for-pay De février 2004 à jour-2 pour v5 et jour-1 pour la version v4 Couverture $\pm 60^\circ$ en latitude / longitude
McClear 	<p><i>Base de données de rayonnement solaire par ciel clair établie par la méthode Heliosat-4 utilisant les données sur l'état optique de l'atmosphère du projet MACC.</i></p> <p>Service WPS de séries temporelles d'irradiation</p> <p>Clients sur www.soda-pro.com</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ www.soda-pro.com/web-services/radiation/mcclear De 2004 à jour-2 Couverture globale
MACC-RAD 	<p><i>Base de données de rayonnement solaire établie par la méthode Heliosat-4 utilisant les éclaircissements par ciel clair de McClear et la prise en compte des effets des nuages avec le module McCloud alimenté en caractérisation du couvert nuageux par l'application par le DLR de la méthode APOLLO sur les images multispectrales du capteur SEVIRI de MSG.</i></p> <p>Service WPS de séries temporelles d'irradiation</p> <p>Client sur www.soda-pro.com</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ www.soda-pro.com/web-services/radiation/macc-rad De 2004 à jour-2 Couverture $\pm 60^\circ$ en latitude / longitude
Solar Geometry 2 	<p><i>Service de calcul rapide de séries temporelles de descripteurs relatifs à la position topocentrique du Soleil (angles solaires de déclinaison, d'élévation et d'azimut)</i></p> <p>Service WPS de séries temporelles de position angulaire du Soleil</p> <p>Client sur www.soda-pro.com</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ www.soda-pro.com/web-services/astronomy/solar-geometry-2 De 1980 à 2030 Couverture globale



Solar Med Atlas 	<i>Base de données et de services pour la constitution de l'atlas du gisement solaire à 1 km pour les pays de l'Afrique du Nord sur le pourtour méditerranéen.</i> Services WMS de cartes d'irradiation Services WPS de séries temporelles d'irradiations mensuelles et annuelles Services WPS de calcul de production solaire d'eau chaude Clients sur www.solar-med-atlas.org
Atlas Solaire Paca 	<i>Atlas du gisement solaire à 200 m de résolution pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.</i> Services WMS de cartes d'irradiation Services WMS de cartes additionnelles d'intérêt pour le développement de projets photovoltaïque ou solaire thermodynamique Clients sur www.atlas-solaire.fr et www.webservice-energy.org/viewer/heron/applications/atlas-paca/

Tableau 4 : Liste de base de données et de services sur le rayonnement solaire disséminés par des services au standard OGC (WMS, WPS).

2. TRANSFERTS D'EXPERTISE VERS LA SPHERE ECONOMIQUE

2.1 Transfert vers Transvalor Innovation

En 2009, nous avons décidé de transférer l'activité commerciale de ventes et d'abonnements relative aux données de rayonnement solaire issues de la base de données HelioClim-3 à la PME Transvalor S.A. au sein de sa branche Transvalor Innovation⁴³. Transvalor S.A. est une filiale d'ARMINES qui en est son actionnaire de référence et dont l'objectif est de porter vers l'industrie le processus de transformation de résultats de recherche en innovation.

Le transfert de ces activités a été un succès et, actuellement, 3,5 postes d'ingénieurs en équivalent temps plein sont dédiés à la commercialisation de données HelioClim-3 et aux services d'expertise associés.

Un effort important a bien entendu été produit par le centre O.I.E. et Transvalor Innovation pour assurer les transferts techniques et matériels qui ont été nécessaires pour mettre en place et en opération les bases de données, les sites ainsi que les services web.

En plus de ces aspects techniques et matériels, ce transfert d'activité a nécessité d'assurer un transfert d'expertise pour que l'équipe de Transvalor Innovation soit prête à faire face aux besoins spécifiques d'expertise de certains utilisateurs de HelioClim-3 :

- qualification de leurs mesures pyranométriques ;
- comparaison et étalonnage – le cas échéant – des estimations HelioClim-3 avec ces mesures *in-situ* qualifiées ;
- génération d'années typiques et pessimistes de la ressource solaire sur un site pour l'analyse technico-financière demandée par les banques ;
- demandes de cartes d'irradiations avec prise en compte de mesures *in-situ*, etc.

Depuis 2009, j'assure une grande partie de ce transfert de compétences, d'outils spécifiques de traitements de données de rayonnement solaire et de support d'expertise. J'estime que ce lien

⁴³ [/www.transvalor.com/fr/cmsspages/transvalor-innovation.27.html](http://www.transvalor.com/fr/cmsspages/transvalor-innovation.27.html)

étroit tissé avec Transvalor Innovation a été très fructueux aussi pour le centre O.I.E. En effet, ce contact au plus près des utilisateurs finaux des données de rayonnement solaire permet de mieux comprendre leurs besoins en finesse et précision de caractérisation et de faire émerger de nouvelles questions de recherche.

2.2 « *Solar Training* » : formation au rayonnement solaire en direction des PME

Depuis 2009, j'assure le cours – en français – d'une journée complète sur la ressource solaire pour le mastère spécialisé « Energies renouvelables » de MINES ParisTech, organisé en partenariat avec l'EUREC Agency⁴⁴.

Depuis 2012, j'assure le cours « *The solar ressource* » – en anglais – du tronc commun du mastère spécialisé REST⁴⁵ de Polytechnique.

Ces formations en mastères spécialisés sont un moyen efficace pour transmettre une partie de l'expertise que j'ai pu acquérir dans ce domaine à de jeunes ingénieurs ou docteurs, irriguant ainsi, in fine, le tissu industriel.

Par ailleurs, depuis 2013, je participe à l'organisation et à la réalisation d'une formation annuelle de trois jours sur le rayonnement solaire. Cette formation, co-organisée par le centre O.I.E. et Transvalor Innovation, est gratuite et dédiée aux professionnels possédant déjà une expertise dans le domaine du rayonnement solaire. L'objectif est de leur apporter des éléments clés suivant de deux axes : (1) la présentation des notions générales et essentielles sur le rayonnement solaire et (2) la présentation des dernières innovations à la pointe de la recherche dans le domaine.

Cette année, ce sont trente-quatre professionnels du secteur des énergies renouvelables provenant de l'Union européenne, de Turquie, du Maroc, d'Algérie et même du Brésil, qui ont participé à cette session. Il s'agissait d'une nouvelle mouture du cours, moins académique et organisée autour des différentes étapes de conception et de développement d'un projet fictif de centrale photovoltaïque. Au gré des étapes de développement de ce projet, ont été présentés les aspects principaux relatifs à la ressource solaire comme la recherche de mesures de rayonnement et d'atlas, la cartographie et les systèmes d'informations géographiques, la mesure du rayonnement *in-situ*, l'estimation par satellite ou par modèle numérique météorologique, l'analyse technico-financière, ou encore la prévision du rayonnement. La partie analyse financière a fait l'objet d'une intervention très appréciée d'un expert de la banque Caisse d'Epargne Provence-Alpes-Corse, spécialisé dans le financement structuré de grands projets photovoltaïques.

2.3 Participation à la tâche 46 du programme SHC de l'AIE

Ainsi que précisé en début de section I-2. et dans la section IV-4.1, je participe activement, avec le soutien de l'ADEME, à la tâche 46 « *Solar Resource Assessment and Forecasting* » du programme SHC de l'AIE. Dans le cadre de ces activités, une partie consiste en de la dissémination de bonnes pratiques et de recommandations (*best-practices and guidelines*).

Ainsi, ai-je pris part, par exemple, à un rapport collectif recueillant des « bonnes pratiques » pour la collecte et l'utilisation de données de rayonnement solaire pour des applications en énergie solaire ([Sengupta et al., 2015](#)). Le *webinar* ([Blanc et al., 2013b](#)) dont j'ai fait mention dans la section I-2.4 est aussi un exemple d'action de dissémination auprès de la sphère économique.

En collaboration avec le programme SolarPACES⁴⁶ (*Solar Power And Chemical Energy Systems*) de l'AIE, je fais partie du petit groupe de travail comprenant six experts internationaux pour rédiger

⁴⁴ EUREC: Association of European Renewable Energy Research Centers (www.eurec.be)

⁴⁵ Master REST: Master Renewable Energy Science & Technologies (www.master-renewable-energy.com)

les bonnes pratiques et les perspectives de recherche concernant l'établissement de données météorologiques pour la simulation de données de production de systèmes solaires thermodynamiques à concentration.

3. CONTRIBUTIONS A LA TRANSITION ENERGETIQUE

J'ai participé à l'ouvrage collectif « Energie à découvert » en co-rédigeant le chapitre sur l'importance et les moyens de caractérisation de la ressource solaire ([Blanc et al., 2013a](#)). Cet ouvrage de vulgarisation scientifique a pour objectif de proposer au public un état des lieux des différentes sources d'énergie (renouvelables, fossiles, nucléaires) pour alimenter le débat national sur la transition énergétique.

Un autre exemple concerne l'atlas solaire PACA décrit dans la section I-2.2. Ce dernier a été utilisé et/ou référencé en outre dans le cadre des actions gouvernementales, régionales ou départementales sur la transition énergétique avec, notamment, la création du Schéma Régionaux Climats Air Energie (SRCAE) finalisé en juillet 2013.

De manière non-exhaustive, l'atlas est référencé :

- dans l'atlas des Energies en PACA de l'Observatoire Régionale de l'Energie, du Climat et de l'Air de PACA (ORECA) (Hiron *et al.*, 2013) ;
- dans la thématique « Energie » du Géoportail : www.geoportail.gouv.fr/donnees?thematique=Energie&type=thematique
- dans l'outil en ligne de cartographie du département des Alpes Maritimes : www.carto-cq06.fr/#territoire06
- dans l'outil SIG en ligne Geo-IDE Carto de la DREAL PACA : carmen.developpement-durable.gouv.fr/25/environnement.map#

J'ai d'ailleurs été le récipiendaire, en 2014, du Trophée d'Argent du Trophée Climat Air Energie du conseil général des Alpes Maritimes, pour l'atlas solaire PACA et ses applications très concrètes dans des études d'opportunité de remonte pente photovoltaïque pour des stations de ski du département (*cf.* figure 27) ou encore de projets collectifs d'installation de systèmes photovoltaïques dans des hameaux des Alpes Maritimes.

⁴⁶ www.solarpaces.org/

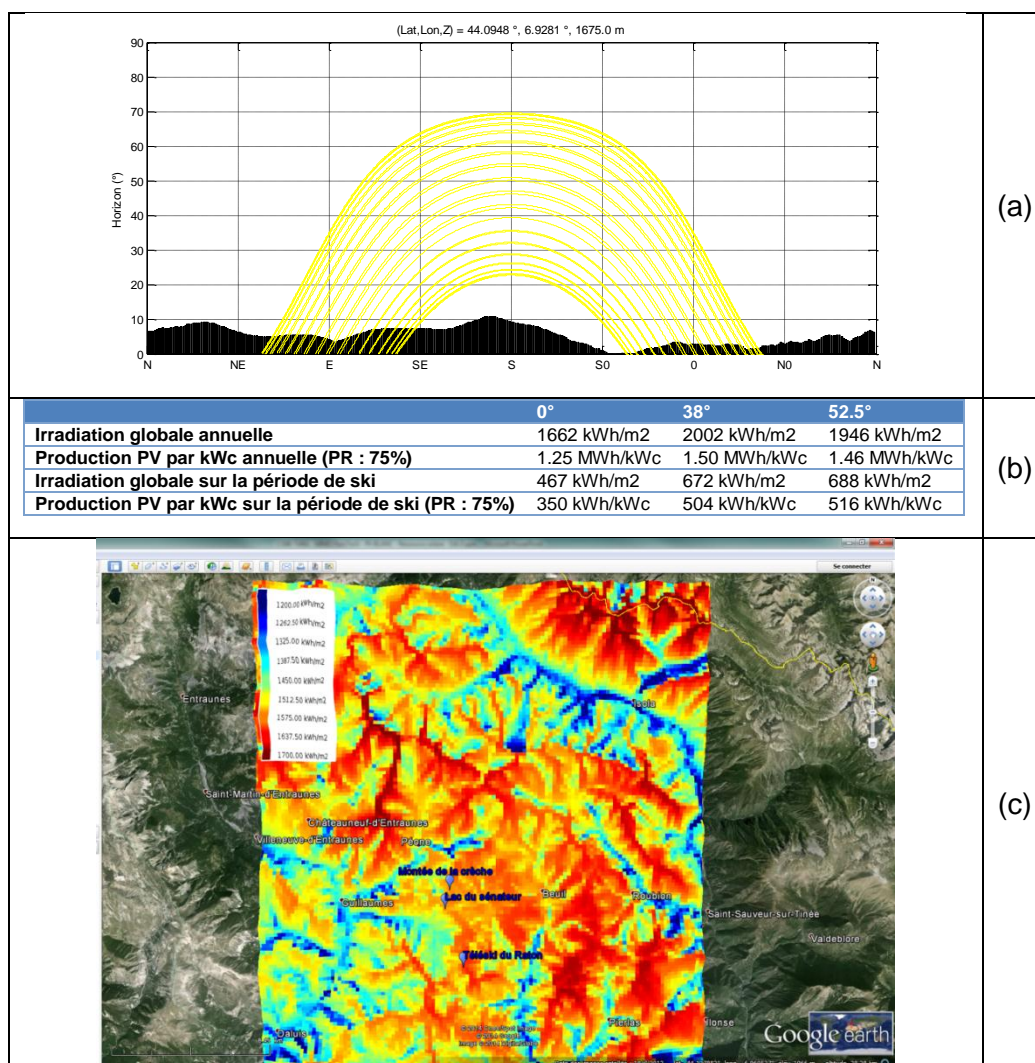


Figure 27 : Illustration des résultats d'analyse d'opportunité d'une installation solaire photovoltaïque pour alimenter un remonte-pente mécanique pour la station de ski de Valberg (06). (a) Évaluation du masque d'ombrage avec SRTM-v4. (b) Évaluation en moyenne sur la période 2005-2014 du gisement solaire et photovoltaïque pour trois inclinaisons des panneaux. (c) Cartographie de l'éclairement global sur plan horizontal extraite de l'atlas solaire PACA autour de la zone d'intérêt.

Cette contribution à la transition énergétique locale s'est formalisée avec ma participation, depuis 2012, au conseil scientifique du Parc Naturel Régional des Préalpes d'Azur (PNRPA)⁴⁷, sur les thématiques liées à l'énergie. Depuis mai 2014, j'en suis un des vice-présidents.

Ce parc est né en mars 2012 à l'initiative des collectivités locales. Il a pour ambition de dynamiser les activités économiques de la région par la préservation et la mise en valeur des patrimoines naturels, culturels et paysagers. Le Conseil Scientifique du PNRPA a un rôle consultatif auprès du Comité Syndical. Il constitue un véritable outil d'aide à la décision pour les élus et d'aide à la construction du projet de territoire. Il a pour vocation d'alerter le PNRPA, non seulement sur les enjeux environnementaux et patrimoniaux, mais aussi sur les interactions avec les enjeux économiques et sociaux du territoire, notamment dans le contexte actuel de la transition énergétique.

⁴⁷ www.pnr-prealpesdazur.fr/

CHAPITRE III - PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES ET PROJETS

Mes perspectives de recherche à moyen terme portent en premier lieu sur la poursuite des activités reconnues internationalement du centre sur la caractérisation de la ressource solaire par des techniques d'observation de la Terre.

Par ailleurs, depuis 2012, je me suis progressivement impliqué dans la recherche relative à la prévision du rayonnement solaire à court terme, essentiellement en intra-journalier, s'appuyant d'une part sur l'estimation du rayonnement solaire par satellite et d'autre part sur l'instrumentation de mesure *in-situ* comprenant des capteurs pyranométriques ainsi que des caméras hémisphériques.

L'objet de ce chapitre est de décrire plus en détail les perspectives et les projets en cours et futurs portant sur ces deux domaines d'activité de recherche rattachés à la ressource solaire : l'une portant sur le passé et les données historiques de caractérisation de la ressource solaire, l'autre portant sur le présent et le futur.

Par ailleurs, étant responsable des activités de recherche sur l'estimation des ressources énergétiques renouvelables au sein du centre O.I.E., j'ai aussi comme objectif à long terme de susciter des « ouvertures » et de déterminer collégialement de nouveaux axes de développements et de recherche, en profitant de l'expérience acquise du centre notamment dans les domaines de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne.

Ainsi, avons-nous l'intention d'explorer le potentiel des données d'observation de la Terre pour l'énergie des océans, la géothermie et la biomasse. La mise en place d'une chaire d'enseignement et de recherche, s'inscrivant dans le cadre de GEOSS et de son domaine sociétal « Energie », facilitera cet élargissement et la diffusion de nos connaissances dans le monde académique et industriel.

1. CARACTERISATION DE LA RESSOURCE SOLAIRE

Des efforts seront à porter sur le modèle McClear et la méthode Heliosat-4 afin de poursuivre la caractérisation de leurs qualités et défauts, d'établir des modèles d'incertitude des estimations et éventuellement de proposer des modèles statistiques de correction en post-traitement.

Par ailleurs, la modélisation physique par la résolution des équations de transfert radiatif qui sous-tend la méthode Heliosat-4 ouvre la voie à une caractérisation plus détaillée et plus fine du rayonnement solaire avec une modélisation de sa distribution spectrale mais aussi angulaire avec la luminance solaire incidente.

1.1 Vers une modélisation de la distribution spectrale du rayonnement solaire

Les différents systèmes de conversion d'énergie solaire en électricité ou en énergie thermique ont des sensibilités spectrales différentes. Ainsi les systèmes photovoltaïques présentent-ils des sensibilités spectrales nettement plus étroites que la bande courte de 300 nm à 4000 nm : par exemple, les cellules photovoltaïques (PV) mono-Si – silicium mono cristallin – ont typiquement une sensibilité spectrale entre 400 nm et 1200 nm alors que les cellules PV CdTe – tellure de cadmium – ont une sensibilité entre 300 nm et 900 nm. Les effets spectraux induits par ces sensibilités spectrales réduites ne sont pas négligeables : elles peuvent ainsi induire une variabilité de plus de 8 % dans la production électrique annuelle d'un système photovoltaïque (Ishii *et al.*, 2013).

Bien entendu, d'autres domaines en relation avec le rayonnement solaire requièrent cette caractérisation spectrale comme la santé humaine – essentiellement pour le domaine spectral de l'UV entre 280 nm et 400 nm –, l'architecture et l'éclairage naturel – dans le domaine de la lumière

du jour entre 380 nm et 780 nm – ou encore dans le domaine de l'agriculture et la foresterie – dans le domaine spectral photosynthétiquement actif (PAR, *Photosynthetically Active Radiation*) entre 400 nm et 700 nm.

Il y a donc effectivement un besoin d'une caractérisation précise de la distribution spectrale du rayonnement solaire incident au sol. Nous chercherons à mettre en place une méthode opérationnelle dans le prolongement de la méthode Heliosat-4, en utilisant notamment la détermination de la distribution spectrale suivant les 32 fenêtres spectrales proposées par Kato et al. (1999) pour représenter la distribution spectrale avec une précision acceptable ([Wandji Nyamsi et al., 2014](#)). La thèse de M. William Wandji Nyamsi, qui sera soutenue en novembre 2015, propose une méthode numérique permettant, par ciel clair, une estimation fine – au pas de 1 nm – de la distribution spectrale du rayonnement à partir de la caractérisation sur les 32 bandes spectrales de Kato (cf. figure 28). Les performances encourageantes de cette méthode démontrées notamment dans les bandes spectrales de l'UV, le PAR ([Wandji Nyamsi et al., 2015](#)) ou la lumière du jour nous incitent à poursuivre dans cette voie. La première étape consistera tout d'abord à vérifier que si l'approximation de découplage des nuages et de la transparence de l'atmosphère claire (cf. section I-2.3.1) est toujours valide « spectralement ». Le cas échéant, on déterminera et modélisera vraisemblablement par des abaques pré-calculés avec libRadtran les effets conjugués des nuages et de l'albédo du sol pour établir une version spectrale de la méthode Heliosat-4.

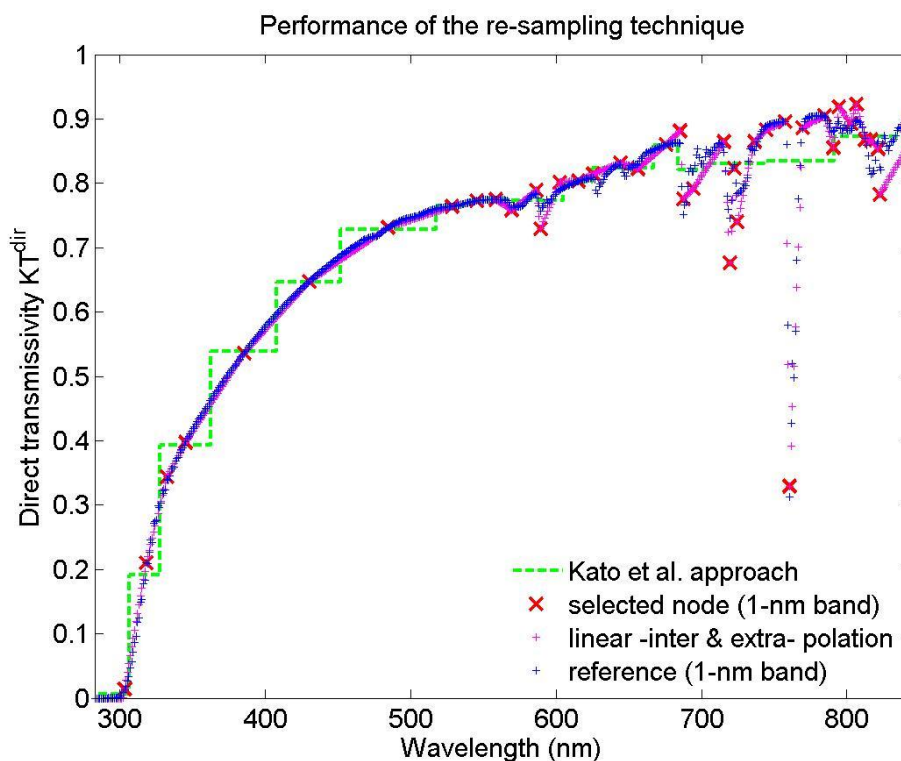


Figure 28 : Exemple de restitution à 1 nm de la distribution spectrale de l'éclairement global horizontal par ciel clair (magenta) à partir de la distribution spectrale établie sur 32 bandes spectrales par l'approche de Kato et al. (1999). La courbe bleue correspond à la distribution spectrale de référence.

1.2 Vers une modélisation de la distribution angulaire du rayonnement solaire

Les systèmes de conversion solaire à concentration (CST, *Concentrated Solar Technologies*) comme le photovoltaïque à concentration (CPV, *Concentrated PhotoVoltaic*) ou les systèmes de production électrique par conversion thermodynamique du rayonnement solaire concentré (CSTE,

Concentrated Solar Thermal Electricity) permettent l'exploitation de l'éclairement solaire direct comprenant une part de la luminance solaire incidente dans la région circumsolaire, en fonction des divers angles d'ouverture bien souvent plus petits que les angles d'ouverture des systèmes pyranométriques ([Blanc et al., 2014](#)). Les systèmes de conversion solaire PV sans concentration permettent la conversion de l'éclairement global incident sur le plan incliné des capteurs qui est le résultat de l'intégration angulaire hémisphérique de la luminance solaire incidente L tenant compte de la normale au plan et d'éventuels effets d'obstacles ou de réflexions multiples avec le relief ou des bâtiments environnants. Dans les deux cas, la caractérisation ou la modélisation de la luminance solaire incidente est nécessaire. Cette caractérisation doit être définie spectralement, notamment pour toutes les applications liées aux moyens de conversion photovoltaïque : la description angulaire ne peut être, *a priori*, découplée de la description spectrale du rayonnement solaire. Comme précédemment, l'intérêt d'une description angulaire du rayonnement solaire ne se limite pas au domaine de l'énergie solaire mais trouve aussi son intérêt notamment pour l'éclairage naturel en architecture ou en urbanisme.

La thèse de M. Yehia Eissa que j'ai co-encadrée (*cf.* section IV-5.1 ; [Eissa, 2015](#)), soutenue en juin 2015, est une première contribution à l'amélioration de la caractérisation angulaire de la luminance solaire incidente dans le cas particulier de la zone circumsolaire – moins de 5° du centre du Soleil –, en milieu désertique et par ciel clair. Après avoir déterminé les propriétés optiques des aérosols les plus influentes comme l'épaisseur optique et la fonction de phase des aérosols, le modèle numérique de transfert radiatif libRadtran a été utilisé pour modéliser les éclairagements spectraux et totaux dans leurs composantes directs et circumsolaires en incidence normale ([Eissa et al., 2015](#)). Un modèle paramétrique empirique simplifié et très rapide a été développé qui reproduit les résultats de libRadtran. Pour un demi-angle d'ouverture quelconque entre $0,4^\circ$ et 5° , il estime le ratio circumsolaire (CSR, *CircumSolar Ratio*), soit le rapport entre l'éclairement circumsolaire en incidence normale et la somme de ce dernier avec l'éclairement direct en incidence normale provenant du disque solaire uniquement ($0,266^\circ$). Cette estimation est faite à partir de mesures standards des éclairagements direct et diffus, en calculant un indice empirique, appelé indice de clarté du ciel (SC, *Sky Clearness Index*), proposé par Perez *et al.* (1993). Le modèle a été validé pour deux stations de mesure dans les Emirats Arabes Unis et en Algérie.

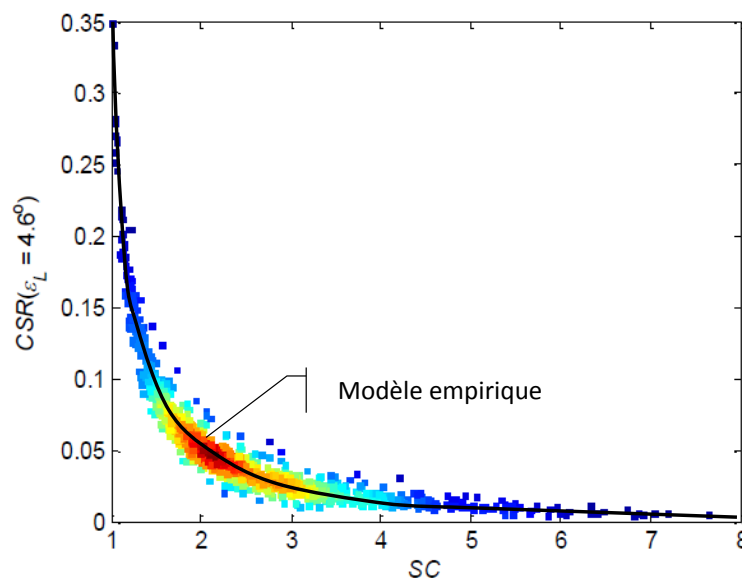


Figure 29 : Histogramme à deux dimensions mettant en relation l'indice de clarté du ciel (SC) et le ratio circumsolaire (CSR) calculé par libRadtran pour un demi-angle d'ouverture de $4,6^\circ$. En trait noir est représenté le modèle empirique proposé permettant d'estimer le CSR pour un indice de clarté du ciel SC donné.

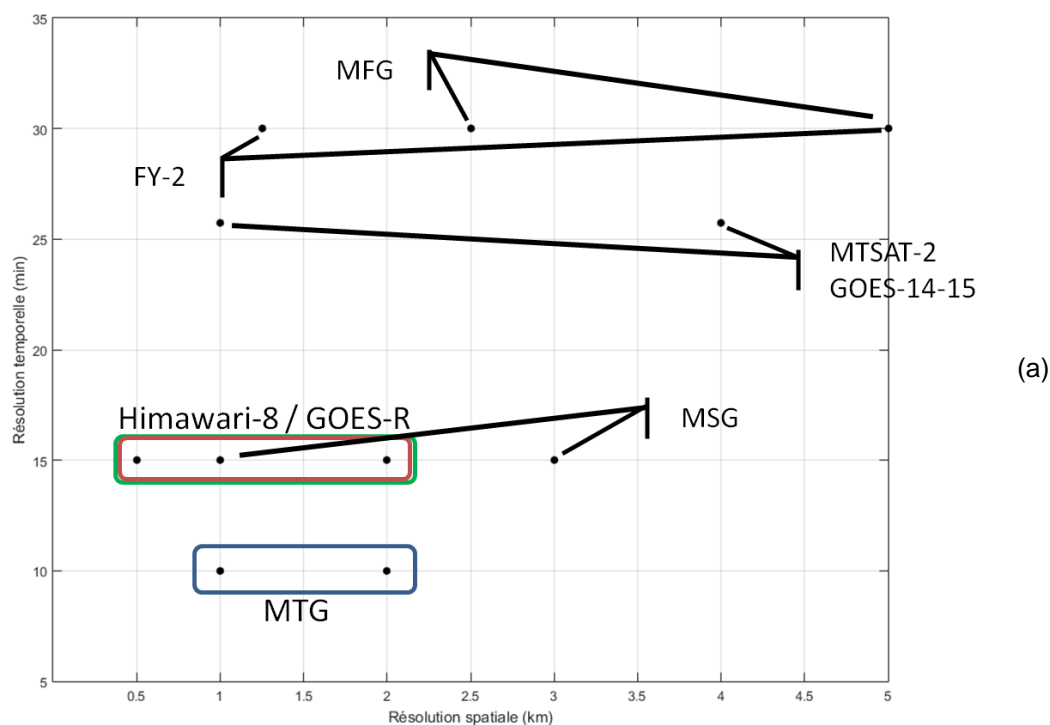
Nous avons l'intention de poursuivre ces développements en s'attachant, dans un premier temps, à généraliser l'approche proposée dans la thèse de M. Yehia Eissa pour d'autres zones, pas uniquement dans des environnements désertiques, mais toujours dans le cas de ciel clair. Nous essaierons d'établir, à partir de libRadtran, des méthodes permettant une modélisation paramétrique de la luminance spectrale solaire incidente à partir de la caractérisation des constituants de l'atmosphère claire proposée notamment par les projets MACC et le réseau de photomètres solaires AERONET.

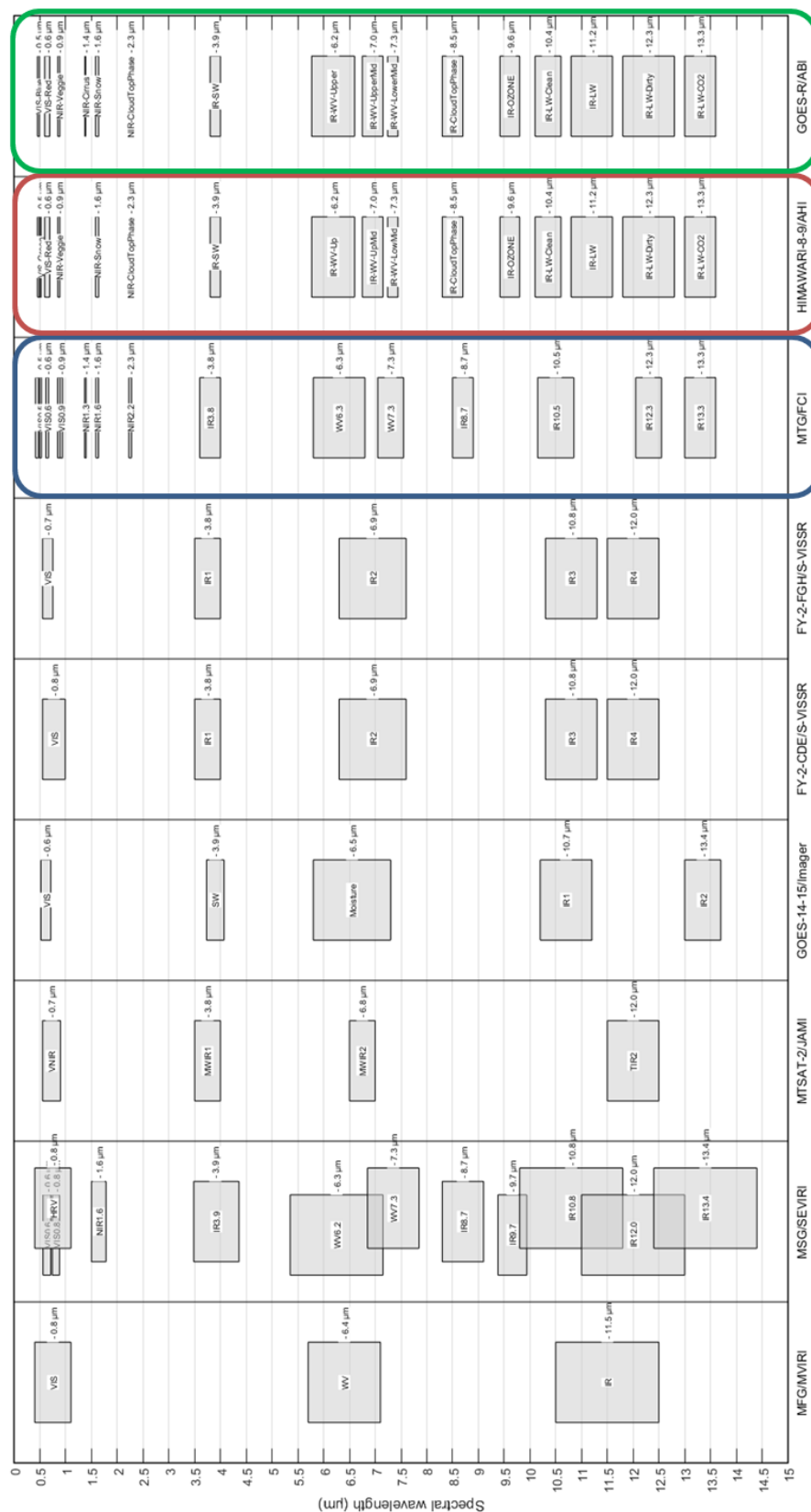
Dans un deuxième temps, nous étendrons ces modèles paramétriques de luminance spectrale solaire incidente à des situations nuageuses. Dans ce cadre, le DLR a récemment proposé une méthode de détection et de caractérisation des cirrus par les images issues du capteur SEVIRI de MSG pour la modélisation du rayonnement circumsolaire (Reinhardt *et al.*, 2014). Nous avons naturellement l'intention de continuer et prolonger la fructueuse collaboration que nous avons établie de longue date avec le DLR pour la méthode Heliosat-4 et la caractérisation des nuages par MSG (*cf.* section I-2.3.3).

1.3 Exploitation des capacités étendues des nouveaux satellites météorologiques géostationnaires

Nous exploiterons les progrès attendus des moyens d'observation de la Terre dans la connaissance des paramètres optiques de l'atmosphère claire et des nuages pour améliorer les estimations du rayonnement solaire dans le cadre de la méthode Heliosat-4 et de ses possibles évolutions et améliorations.

Notamment, les prochaines années vont voir le lancement en orbite de nouveaux satellites météorologiques géostationnaires comme HIMAWARI-8 (juillet 2015), GOES-R (mars 2016) et MTG (2018) qui auront des capacités en termes de résolution spatiale – meilleure que le kilomètre –, de résolution temporelle – meilleure que 15 min – et spectrales en très nets progrès (*cf.* figure 30).





(b)

Figure 30 : Représentation des résolutions spatiales et temporelles (a) et des définitions spectrales (b) des anciens, nouveaux et futurs satellites météorologiques géostationnaires dans le monde.

La thèse cofinancée par *Thales Alenia Space* de M. Youva Aoun, que je co-encadre et qui a débuté en octobre 2013, a pour objectif d'évaluer les capacités du capteur FCI (*Flexible Combined Imager*) du futur satellite MTG à détecter et caractériser les propriétés optiques des aérosols, leur contenu et leur type. Cette thèse permettra d'analyser la sensibilité des différents canaux spectraux de FCI aux propriétés optiques des aérosols et d'en déterminer leurs observabilités par rapport aux autres sources de variabilité ici exogènes qui sont, par exemple, l'albédo du sol, l'angle zénithal solaire ou encore le bruit de mesures des luminances. Elle permettra en outre de donner des recommandations pour d'éventuels futurs capteurs pour de meilleures performances vis-à-vis de la caractérisation des aérosols. Enfin, cette thèse constitue pour le centre un moyen de commencer à anticiper et à appréhender ce futur satellite météorologique qui sera, dans quelques années, la source d'information satellite principale pour les évolutions de la méthode Heliosat-4.

Dans les années futures, nous suivrons de près cette capacité potentielle de MTG – mais aussi des satellites Himawari-8 et GOES-R – à caractériser les aérosols à des échelles spatiales et temporelles nettement plus fines que ne le permettent des modèles numériques actuelles de chimie transport comme celui du projet MACC. Ces améliorations seront vraisemblablement significatives et intéressantes dans les zones présentant de fortes variabilités spatiales et temporelles de la concentration en aérosols comme les zones désertiques de la région du Moyen Orient et de l'Afrique du Nord (MENA, *Middle East and North Africa*).

De plus, ces nouvelles capacités en termes de résolutions spatiales, temporelles et spectrales de ces nouveaux satellites météorologiques géostationnaires ouvrent la voie à des améliorations potentiellement très significatives dans la caractérisation des nuages. Plusieurs algorithmes de caractérisation des nuages adaptés aux capteurs des futurs ou nouveaux satellites GOES-R et HIMAWARI-8 existent déjà comme OCA (Watts *et al.*, 2011) ou DCOMP (Walther *et al.*, 2013).

Une collaboration avec le *BoM* d'Australie est d'ailleurs actuellement en cours pour appliquer la méthode Heliosat-4 et son module McCloud à la caractérisation des nuages issue de l'application de l'algorithme DCOMP au capteur AHI (*Advanced Himawari Imager*) du satellite HIMAWARI-8.

La méthode Heliosat-4 – avec vraisemblablement des versions adaptées de McCloud – sera alors testée avec ces différents produits de caractérisation de nuages sur la base de comparaisons avec des mesures pyranométriques *in-situ*. Outre l'intérêt direct de telles études pour améliorer et étendre à de nouveaux satellites la méthode Heliosat-4, nous pensons qu'elles présenteront un intérêt pour la communauté scientifique s'intéressant à la caractérisation optique des nuages.

2. PREVISION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

La prévision de la ressource solaire correspond à un besoin réel et clairement établi pour permettre le développement de la filière électrique solaire. Elle dispose, à mon sens, d'un fort potentiel d'innovation et d'un réel intérêt pour des PME souhaitant développer des services à valeur ajoutée ayant pour support la prévision du rayonnement solaire.

La thèse de M. Romain Dambreville, soutenue en novembre 2014, que j'ai co-encadrée (cf. section IV-5.1), traite de l'apport, pour la prévision à court terme en intra-horaire :

- de l'information spatio-temporelle sur le rayonnement disponible en quasi-temps réel avec la base de données HelioClim-3 dans un voisinage d'un site d'intérêt ;
- des images du ciel issues de caméras hémisphériques.

Ces travaux originaux, réalisés avec ma collaboration, ont donné lieu à une publication dans une revue internationale à comité de lecture ([Dambreville et al., 2014a](#)), une communication avec actes ([Dambreville et al., 2014b](#)), ainsi qu'à un dépôt de brevet par d'EDF R&D, dont je suis co-inventeur ([Dambreville et al., 2014c](#)).

Ces récents résultats de nos activités de recherche sur la prévision de la ressource solaire à court terme utilisant des données issues des satellites – par exemple HelioClim-3 – et/ou des caméras hémisphériques *in-situ* étant très prometteurs, nous allons poursuivre nos efforts dans ce domaine.

Dans le cadre du projet FP7 DNICast (*cf.* section IV-3), récemment démarré en novembre 2013, nous poursuivons, notamment avec le DLR et l'université de Patras (Grèce), des activités de recherche pour la prévision à moins de 240 min de l'éclairement direct en incidence normale, pour répondre aux besoins des industriels des systèmes solaires thermodynamiques à concentration. Plus précisément, nous sommes notamment en charge du développement d'une méthode de prévision à très court terme – moins de 15 min – et à haute résolution temporelle – toutes les 30 s – de cartes de 1 km², de résolution décimétrique de l'éclairement direct en incidence normale. Cette méthode utilise des caméras hémisphériques et leurs capacités à estimer la position et la vitesse 3D des nuages au-dessus d'un site que nous avons déjà explorées avec une étude pour EDF R&D (*cf.* section I-2.4). Les expérimentations sont menées sur un site de recherche dans le Sud de l'Espagne, près d'Almería, commun au CIEMAT (*Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas*⁴⁸) et au DLR. Ce site est équipé de quatre caméras hémisphériques réparties à des distances comprises entre 500 m et 900 m l'une de l'autre, d'un ceilomètre et d'un réseau d'une vingtaine de capteurs pyranométriques synchronisés (*cf.* figure 31). La figure 32 montre un exemple de résultats d'estimation d'altitude de nuages par l'utilisation de techniques de photogrammétrie stéréoscopique.

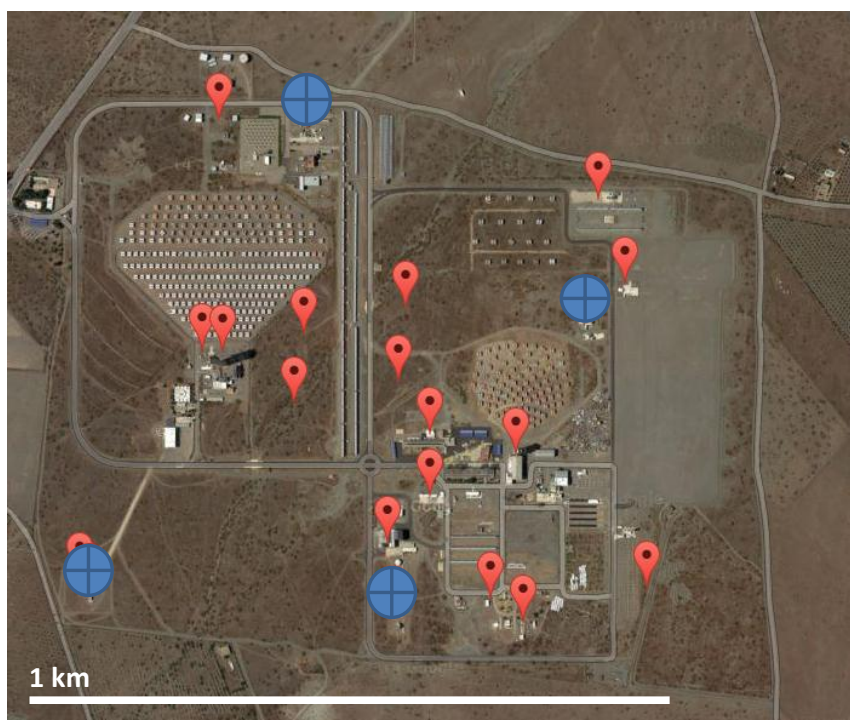


Figure 31 : Localisation des stations pyranométriques (en rouge) et des caméras hémisphériques (en bleu) sur le site de recherche commun au CIEMAT et au DLR, près d'Almeria (Espagne).

⁴⁸ www.ciemat.es

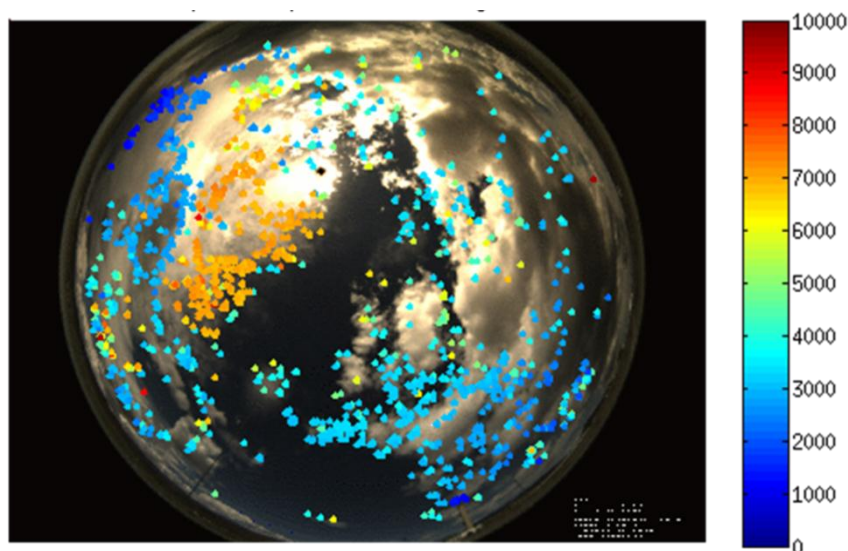


Figure 32 : Exemple de représentation sur une image hémisphérique du ciel des altitudes de portions de nuages estimées entre 1000 m et 10000 m par des techniques de photogrammétrie stéréoscopique appliquées sur un couple d'images issues de caméras hémisphériques du site d'Almería.

Cet équipement exceptionnel ainsi que la quantité et la qualité des mesures *in-situ* et images hémisphériques permettront de développer et de valider de manière extensive des méthodes de prévision à très court terme de l'éclairement direct en incidence normale. Les résultats constitueront, à n'en pas douter, un excellent socle de connaissances et d'expériences acquises dans l'utilisation des caméras hémisphériques pour la prévision à très court terme qui permettront de poursuivre ces activités de recherche dans un contexte stimulant de collaborations internationales et de vif intérêt de la sphère économique et industrielle.

Une voie intéressante de recherche relative à la prévision du rayonnement solaire consiste en la quantification spatiale et temporelle des phénomènes d'intermittence ou de variabilité spatio-temporelle. En effet, alors qu'un grand nombre d'approches de prévision sont actuellement proposées, peu de travaux ont été publiés sur les échelles caractéristiques de la variabilité du rayonnement solaire dans l'espace et le temps. L'analyse de ces échelles doit pouvoir fournir des informations intéressantes pour le développement de méthodes de prévision : elle donnera des indications précieuses sur les différents domaines dans lesquels une approche de prévision peut potentiellement être faite et avec quelle précision. C'est la raison pour laquelle un doctorant que je co-encadre, M. Marc Bengulescu, a commencé une thèse en octobre 2014 sur « l'analyse de la variabilité du rayonnement solaire reçu au sol dans l'espace et le temps » et son « application à la prévision ».

Nous avons enfin le projet avec EDF R&D de démarrer une thèse CIFRE en novembre 2015 portant sur la « synergie des mesures pyranométriques et des images hémisphériques *in-situ* avec des images satellites météorologiques pour la prévision photovoltaïque ». La thèse explorera des pistes nouvelles permettant d'améliorer les prévisions de production existantes en exploitant les synergies des informations issues de différents instruments, capteurs ou de modèles, ayant des caractéristiques spatiales et temporelles différentes.

Les mesures *in-situ* pyranométriques peuvent permettre la prévision à haute résolution temporelle mais le manque de description de la distribution spatiale des nuages en limite les performances pour le très court terme et le moyen court terme au-delà de 15 min. Par ailleurs, la thèse de M. Romain Dambreville, présentée précédemment, a montré l'intérêt de l'estimation spatialement étendue et résolue de l'éclairement solaire par imagerie satellite (HelioClim-3) pour son apport d'information spatiale qui, conjuguée avec des mesures *in-situ* permet l'amélioration sensible des

prévisions à court terme (15 min à 1 - 2 h), suivant une résolution temporelle supérieure ou égale à 15 min.

Enfin, les caméras hémisphériques au sol semblent montrer une excellente aptitude à la prévision à très court terme, et à très haute résolution spatiale. Cependant leur perception des nuages environnants est limitée à un rayon spatial relativement faible, de l'ordre de la dizaine de kilomètres : leurs horizons de prévision sont donc rapidement limités, typiquement dès 10 à 15 min. Ainsi, aucune de ces trois sources d'information ne permet donc, seule, de répondre à l'objectif.

Les questions de recherche seront donc les suivantes : peut-on exploiter la complémentarité entre ces trois sources d'information pour élaborer des schémas de prévision performants de l'éclairement solaire incident à très court terme et à haute résolution temporelle ? Des gains de synergie sont-ils possibles en fusionnant ces différentes informations ?

L'objectif de la thèse est alors de proposer et d'évaluer une méthode de prévision de l'éclairement solaire incident et de son incertitude, à très court terme (1 min à 1 h), à haute résolution temporelle (10 s à 1 min), en fusionnant différentes informations provenant de séries temporelles d'images issues de satellite météorologique géostationnaire et de caméras hémisphériques *in-situ* ainsi que de séries temporelles de mesures pyranométriques *in-situ*.

3. CONCLUSION

Ces perspectives de recherche à court et moyen termes, à 5 ans, sont dans la prolongation de mes activités de recherche actuelles et prennent racine dans les projets et les thèses récemment soumises ou en cours.

A l'exception de celles concernant la prévision, ces perspectives s'attachent à apporter des solutions, au moins partielles, aux quatre verrous présentés au chapitre II, en s'appuyant notamment sur les grandes potentialités qu'offre l'approche par résolution des équations du transfert radiatif choisie pour la méthode Heliosat-4. Ces potentialités vont d'ailleurs de pair avec les améliorations attendues d'une part des instruments sur les satellites géostationnaires météorologiques et d'autre part des modèles numériques météorologiques.

Afin de mieux fédérer, au niveau européen, ces perspectives de recherche sur l'estimation du rayonnement solaire par observation de la Terre, je vais organiser d'ici la fin de l'année 2015 un séminaire spécifique en invitant les différentes parties prenantes européennes du domaine, instituts de recherche ou entreprises. L'objectif de ce séminaire sera d'échanger sur les difficultés scientifiques et techniques rencontrées, les verrous et les solutions potentielles.

Concernant plus particulièrement le quatrième verrou, j'ai l'intention aussi de participer aux efforts du centre sur les mesures *in-situ* en s'attachant notamment à favoriser leurs disséminations par des services web interopérables basés sur le standard ouvert SOS (*Sensor Observation Service*) de l'OGC. Nous poursuivrons aussi nos activités de recherches sur les caméras hémisphériques. Avec l'Université de Patras (Grèce), j'ai l'intention de proposer, en 2016, une action sur quatre ans dans le cadre du programme européen COST afin de créer un réseau international de chercheurs et d'industriels visant à développer et promouvoir l'utilisation de ces caméras hémisphériques comme instrument de mesure météorologique *in-situ*.

Les activités de recherche sur la prévision ouvrent une nouvelle voix pour le centre. En utilisant les estimations par satellite, les mesures pyranométriques ou encore les caméras hémisphériques *in-situ*, on s'attachera en fait à apporter des éléments de réponse au nouveau verrou suivant : le déficit, aux fines échelles, de l'information sur les corrélations spatio-temporelles relatives à l'état de l'atmosphère nécessaire à la prévision à haute résolution du rayonnement solaire à court terme.

L'ensemble de ces perspectives de recherche recoupe les axes du plan de travail en cours de rédaction pour la future tâche d'experts de l'AIE, dans la prolongation de la tâche SHC-46 (cf. section IV-2.8), pour la période 2016-2020.

CHAPITRE IV - CURRICULUM VITAE DETAILLE

1. MINI-CV

Dr Philippe BLANC

Français, 42 ans, marié
1808 Chemin Sainte Colombe
06140 Vence, France
Mob. : +33 (0)6-60-65-01-50
Mél : philippe.blanc@gmail.com

*Responsable des activités de recherche sur l'évaluation
des ressources énergétiques renouvelables*
Centre Observation, Impacts, Energie (O.I.E.)
MINES ParisTech / ARMINES
CS 10207, F-06904 Sophia Antipolis CEDEX, France
Tel. : +33 (0)4-93-95-74-04
Mél : philippe.blanc@mines-paristech.fr

Formation, diplômes

- 1999** Docteur en sciences de l'**Ecole des Mines de Paris**, spécialité "Informatique temps réel - Robotique - Automatique"
- 1995** **Diplôme d'Etudes Approfondies** Signal, Télécommunications, Images et Radar option Image de l'**université de Rennes** (mention bien)
- 1992 – 1995** **Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne**
Option de troisième année : Communications, Optique, Formes et Images (mention bien)
- 1991 – 1992** Mathématiques Supérieures et **Mathématiques Spéciales M'**, Lycée Thiers, Marseille

Parcours professionnel

- Depuis 2007**
8 ans **MINES ParisTech / ARMINES : Enseignant-Chercheur, responsable des activités de recherche sur l'évaluation des ressources énergétiques renouvelables au sein du Centre Observation, Impacts, Energie**
Thèmes principaux :
 - météorologie pour l'énergie (modélisation et estimation par satellite et cartographie du rayonnement solaire, potentiels des énergies renouvelables, métrologie)
 - observation de la Terre par imagerie spatiale optique
 - traitement du signal et de l'image, estimation, algorithmique, mathématiques appliquées
- 2000 – 2007**
8 ans **Thales Alenia Space : Ingénieur de recherche en traitement du signal et de l'image**
Thèmes et travaux principaux :
 - responsable système de l'étude des phases 0 et A du futur système d'observation optique militaire européen à très haute résolution, pour le CNES et la DGA
 - la géographie numérique (photogrammétrie, mosaïquage, alignement sub-pixellique)
 - la restauration d'images par déconvolution et débruitage
 - la métrologie et la modélisation et dimensionnement des systèmes d'observation spatiaux (classique et par synthèse d'ouverture optique)
 - traitement du signal et de l'image, algorithmique, mathématiques appliquées, informatique
- 1995 – 1999**
3 ans **Thèse financée par la Délégation Générale pour l'Armement**, en collaboration avec **Alcatel Space Industries**, Cannes, et le **Centre d'Energétique**, de l'**Ecole des Mines de Paris**, Sophia Antipolis
Principaux résultats :
 - Mise en place d'une méthodologie pour la détection des changements environnementaux par télédétection
 - Procédé automatique d'alignement géométrique sub-pixellique d'images par analyse multirésolution, exploité par plusieurs sociétés et instituts européens
- 1996 – 1997**
1 an **Ingénieur pour la société VSM S.A. en tant que scientifique du contingent (service militaire)**
PME spécialisée dans les simulateurs de vol et la synthèse d'images 3D en temps réel
Modélisation 3D de la Principauté de Monaco ; Responsable de la partie visuelle d'un simulateur de vol, présenté au salon aéronautique du Bourget (1997) pour le CNES et au salon IMAGINA (Monaco)

Rôles scientifiques nationaux et internationaux

- **Editeur associé** pour "[Journal of Solar Energy Engineering](#)" de l'*American Society of Mechanical Engineers* (ASME)
- **Expert de l'Agence Internationale de l'Energie** dans le cadre de la [tâche 46](#) «*Solar Resource Assessment and Forecasting*» de son programme «*Solar Heating and Cooling*» (rôle de responsable de la sous-tâche «*Advancing solar resource modeling procedures based on physical principles*»)
- **Expert** nommé par le gouvernement français pour l'action ES1002 «*Weather Intelligence for Renewable Energy*» ([WIRE](#)) du programme de coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique (COST)
- Participation régulière à des **revues d'articles** (50+) pour des revues scientifiques à comité de lecture (*Solar Energy, Renewable Energy, AMT, IJRS, MDPI Sensors, IEEE JSTARS, etc.*)
- **Vice-président du conseil scientifique du Parc Naturel Régional des Pré-Alpes d'Azur**, en charge des aspects relatifs à l'énergie

2. LISTE DES PUBLICATIONS ET BREVETS

(Date de mise à jour : 27 août 2015)

Articles dans des revues à comité de lecture de rang A ⁴⁹	22
Autres articles dans des revues à comité de lecture	6
Articles dans des revues sans comité de lecture	5
Ouvrages scientifiques collectifs	3
Brevets	9 (dont 1 en cours)
Conférences et communications dans des colloques internationaux avec actes	43
Conférences et communications dans des colloques internationaux sans actes	22
Conférences invitées	3
Bases de données et services Web scientifiques de référence	6
Mémoires (travaux issus de la formation de 3 ^{ème} cycle)	2

Quand elles sont disponibles, les versions au format PDF des publications sont référencées sur le site de l'archive ouverte pluridisciplinaire HAL (Hyper Articles en Ligne), sous la forme d'un lien html [HAL](#). De même, quand il y a lieu, la référence de la publication sous la forme d'un lien html [doi](#).

2.1 Articles dans des revues à comité de lecture de rang A⁴

Eissa Y., M. Korany, Y. Aoun, M. Boraiy, M. A. Wahab, S. Alfaro, P. Blanc, M. El-Metwally, H. Ghedira, L. Wald, 2015. Validation of the surface downwelling solar irradiance estimates of the HelioClim-3 database in Egypt. *Remote Sensing*, 7, 9269-9291, [doi: 10.3390/rs70709269](#), [HAL](#).

Eissa Y., Munawwar S., Oumbe A., Blanc P., Ghedira H., Wald L., Bru H., Goffe D., 2015. Validating surface downwelling solar irradiances estimated by the McClear model under cloud-free skies in the United Arab Emirates. *Solar Energy*, 114, 17-31, [doi:10.1016/j.solener.2015.01.017](#), [HAL](#).

Eissa, Y., P. Blanc, L. Wald, H. Ghedira, 2015. Can AERONET data be used to accurately model the monochromatic beam and circumsolar irradiances under cloud-free conditions in desert environment?. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions* 8, 7697–7735. [doi:10.5194/amtd-8-7697-2015](#) (article en « discussion », selon le processus du journal AMT).

Wandji Nyamsi W., A. Arola, P. Blanc, A. V. Lindfors, V. Cesnulyte, M. R. A. Pitkänen, and L. Wald, 2015. Technical Note: A novel parameterization of the transmissivity due to ozone absorption in the k distribution method and correlated k approximation of Kato et al. (1999) over the UV band. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 7449–7456, 2015, [doi: 10.5194/acp-15-7449-2015](#), [HAL](#).

Thorey, J., V. Mallet, C. Chaussin, L. Descamps, P. Blanc, 2015. Ensemble forecast of solar radiation using TIGGE weather forecasts and HelioClim database, *Solar Energy*, 120, 232-243, [doi: 10.1016/j.solener.2015.06.049](#), [HAL](#).

Badosa, J., J. Wood, P. Blanc, C. N. Long, L. Vuilleumier, D. Demengel, and M. Haeffelin, 2014. Solar irradiances measured using SPN1 radiometers: uncertainties and clues for development. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7, 4267-4283. [doi:10.5194/amt-7-4267-2014](#), [HAL](#).

⁴⁹ Il n'existe pas de liste officielle des revues de rang A. J'adopte la définition suivante : une revue de rang A est une revue figurant dans le Journal Citation Reports (JCR) produit par Thomson Reuters, qui fournit des données statistiques concernant les citations de revues incluant le facteur d'impact : [apps.webofknowledge.com](#).

- Blanc P., Espinar B., Geuder N., Gueymard C., Meyer R., Pitz-Paal R., Reinhardt B., Renne D., Sengupta M., Wald L., Wilbert S., 2014. Direct normal irradiance related definitions and applications: the circumsolar issue. *Solar Energy*, 110, 561-577, [doi: 10.1016/j.solener.2014.10.001](https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.001), [HAL](#).
- Dambreville, R., P. Blanc, J. Chanussot, and D. Boldo, 2014. Very short term forecasting of the global horizontal irradiance using a spatio-temporal autoregressive model. *Renewable Energy*, 72, 291–300. [doi:10.1016/j.renene.2014.07.012](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.012).
- Lefèvre, M., P. Blanc, B. Espinar, B. Gschwind, L. Ménard, T. Ranchin, L. Wald, L. Saboret, C. Thomas, and E. Wey. 2014. The HelioClim-1 database of daily solar radiation at Earth surface: an example of the benefits of GEOSS data-core. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(5), 1745–1753. [doi:10.1109/JSTARS.2013.2283791](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2283791), [HAL](#).
- Oumbe, A., Z. Qu, P. Blanc, M. Lefèvre, L. Wald, and S. Cros, 2014. Decoupling the effects of clear atmosphere and clouds to simplify calculations of the broadband solar irradiance at ground level. *Geoscientific Model Development*, 7, 1661-1669, 2014, [doi:10.5194/gmd-7-1661-2014](https://doi.org/10.5194/gmd-7-1661-2014).
- Sylla, D., A. Minghelli-Roman, P. Blanc, A. Mangin, and O. Hembise Fanton d'Andon, 2014. Fusion of multispectral images by extension of the pan-sharpening ARSIS method. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7 (5), 1781–1791. [doi:10.1109/JSTARS.2013.2271911](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2271911).
- Vuilleumier, L., M. Hauser, C. Félix, F. Vignola, P. Blanc, A. Kazantzidis, B. Calpini, 2014. Accuracy of Ground Surface Broadband Shortwave Radiation Monitoring. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 119 (24), 13838–13860. [doi:10.1002/2014JD022335](https://doi.org/10.1002/2014JD022335), [HAL](#).
- Wandji Nyamsi W., Espinar B., Blanc P., Wald L., 2014. How close to detailed spectral calculations is the k-distribution method and correlated-k approximation of Kato *et al.* (1999) in each spectral interval? *Meteorologische Zeitschrift*, 23 (5), 547-556, [doi: 10.1127/metz/2014/0607](https://doi.org/10.1127/metz/2014/0607), [HAL](#).
- Lefèvre, M., A. Oumbe, P. Blanc, B. Espinar, B. Gschwind, Z. Qu, L. Wald, M. Schroedter-Homscheidt, C. Hoyer-Klick, A. Arola, A. Benedetti, J. W. Kaiser and J.-J. Morcrette, 2013. McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 2403–2418. [doi:10.5194/amt-6-2403-2013](https://doi.org/10.5194/amt-6-2403-2013), [HAL](#).
- Vernay, C., P. Blanc, and S. Pitaval, 2013. Characterizing measurements campaigns for an innovative calibration approach of the global horizontal irradiation estimated by HelioClim-3. *Renewable Energy*, 57, 339–347. [doi:10.1016/j.renene.2013.01.049](https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.049).
- Blanc, P., and L. Wald, 2012. The SG2 algorithm for a fast and accurate computation of the position of the sun for multi-decadal time period. *Solar Energy*, 86 (10), 3072–3083. [doi:10.1016/j.solener.2012.07.018](https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.018), [HAL](#).
- Ménard, L., I. Blanc, D. Beloin-Saint-Pierre, B. Gschwind, L. Wald, P. Blanc, T. Ranchin, R. Hirschier, S. Gianfranceschi, S. Smolders, M. Gilles and C. Grassin, 2012. Benefit of GEOSS interoperability in assessment of environmental impacts illustrated by the case of photovoltaic systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5 (6), 1722–1728. [doi:10.1109/JSTARS.2012.2196024](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2196024), [HAL](#).
- Blanc, P., B. Gschwind, M. Lefèvre, and L. Wald, 2011. The HelioClim project: surface solar irradiance data for climate applications. *Remote Sensing*, 3 (12), 343–361. [doi:10.3390/rs3020343](https://doi.org/10.3390/rs3020343), [HAL](#).
- Massip, Pierre, P. Blanc, and L. Wald, 2011. A method to better account for modulation transfer functions in ARSIS-based pansharpening methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50 (3), 800–808. [doi:10.1109/TGRS.2011.2162244](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2162244), [HAL](#).
- Diabaté, L., P. Blanc, and L. Wald, 2004. Solar radiation climate in Africa. *Solar Energy*, 76 (6), 733–744. [doi:10.1016/j.solener.2004.01.002](https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.01.002), [HAL](#).

Rigollier, C., M. Lefèvre, P. Blanc, and L. Wald, 2002. The operational calibration of images taken in the visible channel of the Meteosat series of satellites. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19 (9), 1285–1293. [doi:10.1175/1520-0426\(2002\)019<1285:TOCOIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<1285:TOCOIT>2.0.CO;2), [HAL](#).

Blanc, P. 1998. Using iterated rational filter banks within the ARSIS concept for producing 10m Landsat multispectral images. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (12), 2331–2343. [doi:10.1080/014311698214758](https://doi.org/10.1080/014311698214758), [HAL](#).

2.2 Autres articles dans des revues à comité de lecture

Blanc, P., C. Coulaud, L. Wald, 2015. Yearly changes in surface solar radiation in New Caledonia, *Advances in Science and Research*, 12, 1-4, [doi:10.5194/asr-12-1-2015](https://doi.org/10.5194/asr-12-1-2015), [HAL](#).

Blanc, P., L. Wald, 2015. L'estimation du rayonnement solaire au sol par la nouvelle méthode Heliosat-4. *La Météorologie*, 90, 53-61, [doi: 10.4267/2042/56839](https://doi.org/10.4267/2042/56839).

Wandji Nyamsi W., Espinar B., Blanc P., Wald L., 2015 Estimating the photosynthetically active radiation under clear skies by means of a new approach. *Advances in Science and Research*, 12, 5-10, [doi:10.5194/asr-12-5-2015](https://doi.org/10.5194/asr-12-5-2015), [HAL](#).

Oumbe, A., P. Blanc, B. Gschwind, M. Lefèvre, Z. Qu, M. Schroedter-Homscheidt, and L. Wald, 2011. Solar irradiance in clear atmosphere: study of parameterisations of change with altitude. *Advances in Science and Research*, 6, 199–203. [doi:10.5194/asr-6-199-2011](https://doi.org/10.5194/asr-6-199-2011), [HAL](#).

Qu, Z., P. Blanc, M. Lefèvre, L. Wald, and A. Oumbe, 2011. Study of the MLB parameterisation for change in surface solar irradiance with sun zenith angle in clear sky." *Advances in Science and Research*, 6 (1), 233–236. [doi:10.5194/asr-6-233-2011](https://doi.org/10.5194/asr-6-233-2011), [HAL](#).

Mathieu-Marni, S., P. Blanc, and L. Rognant, 2004. Etude sur l'adéquation des futures images du capteur PLEIADES HR à des thématiques de risques naturels. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 173-174, 53–63.

2.3 Articles dans des revues sans comité de lecture

Kalyanpur, A., M.-E. Mercadier, and P. Blanc, 2013. Gisement solaire en France : caractérisation de la ressource énergétique, profil de répartition et volatilité. *Environnement & Technique*, 54-59, [HAL](#).

Blanc, P., B. Gschwind, M. Lefèvre, L. Ménard, and L. Wald, 2011. Satellite-based estimation of surface solar irradiance. *SPIE Newsroom*, 2 pp. [doi:10.1117/2.1201105.003735](https://doi.org/10.1117/2.1201105.003735), [HAL](#).

Blanc, P., L. Wald, 2009. A review of earth-viewing methods for in-flight assessment of modulation transfer function and noise of optical spaceborne sensors. Working paper, [HAL](#).

Thomas, E., P. Blanc, and F. Falzon, 2006. Optical aperture synthesis for future spaceborne high resolution observation. *Alcatel Telecom Review*, (2nd Quarter), 137–144.

Blanc, P., and E. Savaria, 2001. Mosaicing techniques for spaceborne optical high resolution imagery systems. *Alcatel Telecom Review*, (4th Quarter), 6 pp.

2.4 Ouvrages scientifiques collectifs

Sengupta M., Habte A., Kurtz S., Dobos A., Wilbert S., Lorenz E., Stoffel T., Renné D., Myers D., Wilcox S., Blanc P., Perez R., 2015. Best practices handbook for the collection and use of solar resource data for solar energy applications. Technical Report, NREL/TP-5D00-63112, 251 pages, [HAL](#).

Blanc, P., B. Espinar, and L. Wald, 2013. La ressource solaire : importance et moyens de caractérisation (chapitre 17). *L'énergie à découvrir*, edited by R. Mossery and C. Jeandel, CNRS Editions, 163–164. ISBN : 978-2-271-07678-6.

Espinar, B., and P. Blanc, 2012. Satellite images applied to surface solar radiation estimation (chapitre 4). *Solar Energy at Urban Scale*, edited by B. Beckers, iSTE, 57–98. ISBN: 978-1-84821-356-2.

2.5 Brevets

Dambreville, R., S. Dubost, D. Boldo, J. Chanussot, P. Blanc, 2014. Procédé de prévision de rayonnement solaire au sol au voisinage d'un site. Brevet EDF R&D en cours de dépôt.

Perrin, G., A. Liotard, H. Benard and P. Blanc, 2009. Dispositif de mesure de la fonction de transfert de modulation d'instruments optiques de grande dimension. Brevet Thales ([FR2920536](#), EP2181315). Premier prix du Thales Alenia Space Innovation Award 2007 et médaille d'argent du prix de l'innovation de Thales Group.

Douillet, F. and P. Blanc, 2009. Procédé d'augmentation de résolution d'images multi-spectrales. Brevet Thales ([FR2920869](#), EP2185903).

Blanc, P., 2009. Procédé et dispositif d'observation. Brevet Thales ([FR2918530](#)).

Falzon, F and P. Blanc, 2005. Réflecteur déployable en forme de triangle de Reuleaux, pour un instrument d'observation spatiale. Brevet Alcatel ([FR2890454](#), EP1922572, WO2007028923).

Blanc, P. and E. Thomas., 2004. Procédé de correction de la fonction de transfert d'un interféromètre imageur à pupilles multiples. Brevet Alcatel ([FR2879761](#)).

Blanc, P., 2003. Complètement fréquentiel d'images acquises par un dispositif d'acquisition à Synthèse d'Ouverture Optique dilué par combinaisons d'images fréquemment complémentaires. Brevet Alcatel ([FR2863735](#), EP1544667).

Falzon, F., P. Blanc. and E. Thomas, 2003. Instrument d'observation à synthèse d'ouverture optique en mouvement et procédé associé. Brevet Alcatel ([FR2858425](#)).

Blanc, P. and E. Thomas, 2001. Ensemble imageur a synthese d'ouverture optique. Brevet Alcatel ([FR2832814](#), EP1461660, US2004257263).

2.6 Communications dans des colloques internationaux avec actes

Aoun, Y., P. Blanc, L. Wald, S. Mathieu, M. Claeysman, 2014. Preliminary study of the FCI instrument capability to detect dust aerosols. In: EUMETSAT Meteorological Satellite Conference 2014, Sep 2014, Geneve, Switzerland. S1 (00036), [HAL](#).

Blanc, P., B Gschwind, M. Lefèvre and L. Wald, 2014. Twelve monthly maps of ground albedo parameters derived from MODIS data sets, In: IGARSS 2014, 3270-3272, [HAL](#).

Dambreville, R., P. Blanc, J. Chanussot, D. Boldo, and S. Dubost, 2014b. Very short term forecasting of the global horizontal irradiance through HelioClim maps. In: 5th International Renewable Energy Congress, 6 pp. [doi:10.1109/IREC.2014.6826905](#).

Eissa, Y., P. Blanc, A. Oumbe, H. Ghedira, L. Wald, 2013. Estimation of the circumsolar ratio in a turbid atmosphere. ISES Solar World Congress, Nov 2013, Cancun, Mexico. *Energy Procedia*, 57, 1169 - 1178, [doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.104](#), [HAL](#).

Ménard, L., L. Wald, P. Blanc, B. Gschwind, 2013. Development and Integration of a Local Solar Atlas into a GEOSS compliant Global Spatial Data Infrastructure (GSDI). In: 27th International Conference on Informatics for Environmental Protection, Sep 2013, Hambourg, Germany, [HAL](#).

Vernay, C., S. Pitaval, and P. Blanc, 2013. Review of satellite-based surface solar irradiation databases for the engineering, the financing and the operating of photovoltaic systems. In: ISES Solar World Congress, *Energy Procedia*, 57, 1383 – 1391, [doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.129](#). [HAL](#).

- Espinar, B., P. Blanc, L. Wald, B. Gschwind, L. Ménard, E. Wey, C. Thomas, and L. Saboret, 2012. HelioClim-3: a near-real time and long-term surface solar irradiance database. In: COST WIRE Workshop on "Remote Sensing Measurements for Renewable Energy", 4 pp, [HAL](#).
- Gauchet, C., P. Blanc, B. Espinar, B. Charbonnier, and D. Demengel, 2012. Surface solar irradiance estimation with low-cost fish-eye camera. In: COST WIRE Workshop on "Remote Sensing Measurements for Renewable Energy", 4 pp, [HAL](#).
- Oumbe, A., H. Bru, Z. Hassar, P. Blanc, L. Wald, A. Fournier, D. Goffe, M. Chiesa, H. Ghedira, 2012. Selection and implementation of aerosol data for the prediction of solar resource in United Arab Emirates. In: SolarPACES 2012, 10 pp. (paper 22240), [HAL](#).
- Oumbe, A., Z. Qu, P. Blanc, H. Bru, and L. Wald, 2012. An adaptive method to derive direct irradiance from global irradiance. In: Solar Paces 2012, 6 pp. (paper 22294), [HAL](#).
- Pauwels, M, A Albanel, P. Blanc, F. P. Neirac, and S. Biscaglia, 2012. Assessment of the Potential of Pumped Hydro Energy Storage. In: Hydroenergia 2012, 6 pp.
- Qu, Z., A. Oumbe, P. Blanc, M. Lefèvre, L. Wald, M. Schroedter-homscheidt, G. Gesell, and L. Klueser, 2012. Assessment of Heliosat-4 surface solar irradiance derived on the basis of SEVIRI-APOLLO cloud products Heliosat-4. In: EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 6 pp, [HAL](#).
- Qu, Z., P. Blanc, M. Lefèvre, L. Wald, M. Schroedter-homscheidt, G. Gesell, and L. Klueser, 2012. Use of OCA and APOLLO in Heliosat-4 method for the assessment of surface downwelling solar irradiance. In: EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 8 pp, [HAL](#).
- Vernay, C., S. Pitaval, and P. Blanc, 2012. Calibration of Long-Term Global Horizontal Irradiation Estimated by HelioClim-3 through Short-Term Local Measurement Campaigns: Extending of the Results to European and African Sites. In: World Renewable Energy Forum, 1943–1950, [HAL](#).
- Wey, E., C. Thomas, P. Blanc, B. Espinar, and M. Mouadine, 2012. A fusion method for creating sub-hourly DNI-based tmy from long-term satellite-based and short-term ground-based irradiation data. In: Solar Paces 2012, 6 pp. (paper 22983), [HAL](#).
- Blanc, P., B. Espinar, B. Gschwind, L. Ménard, C. Thomas, and L. Wald, 2011. High spatial resolution solar atlas in Provence-Alpes-Cote d'Azur. In: ISES Solar World Congress 2011, 561-568. (paper 34552), [HAL](#).
- Blanc, P., B. Gschwind, M. Lefèvre, F. Wald, and L. Wald, 2011c. Validating Meteosat-derived surface solar irradiance in Mozambique. In: 30th Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories, 561–568, [HAL](#).
- Hoyer-Klick, C., L. Wald, L. Ménard, P. Blanc, E. Wey, Marcel Suri, T. Cebecauer, T. Huld, H. Allal, A. Bida, M. Mahmoud and L. Lorych, 2011. Solar Atlas for the Southern and Eastern Mediterranean. In: Solar Paces 2011, 7 pp, [HAL](#).
- Ménard, L., B. Gschwind, I. Blanc, D. Beloin-Saint-Pierre, L. Wald, P. Blanc, T. Ranchin, et al, 2011. Environmental impact assessment of electricity production by photovoltaic system using GEOSS recommendations on interoperability. In: 25th EnviroInfo Conference 'Environmental Informatics, 765–774, [HAL](#).
- Qu, Z., P. Blanc, M. Lefèvre, L. Wald, M. Schroedter-Homscheidt, and G. Gesell, 2011. Study of the possible benefits of cloud products of EUMETSAT in solar energy. In: EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 6 pp, [HAL](#).
- Wald, L., and P. Blanc, 2011. The performances of the HelioClim databases in Mozambique. In: ISES Solar World Congress 2011, 268-275, [HAL](#).
- Wald, L., C. Thomas, S. Cousin, P. Blanc, L. Ménard, E. Gaboardi, E. Simeone, and G. Heilscher, 2011. The project ENDORSE: exploiting EO data to develop pre-market services in renewable energy. In: 25th EnviroInfo Conference "Environmental Informatics", 549–556, [HAL](#).

- Wald, L., P. Blanc, B. Espinar, B. Gschwind, M. Lefèvre, L. Ménard, F. Wald, C. Hoyer-Klick, M. Schroedter-Homscheidt, and C. Thomas, 2011. Early achievements towards an automatic assessment of the uncertainty in solar irradiation using web services. In: 25th EnviroInfo Conference "Environmental Informatics", 309–318, [HAL](#).
- Imbert, P., G. Kariniotakis, P. Blanc, and F. P. Neirac, 2010. Resolution enhancement of input parameters in a demand side management model. In: IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2, 734–740. [doi:10.1109/PMAPS.2010.5528403](#), [HAL](#).
- Massip, P., P. Blanc, and L. Wald, 2010. Data fusion: taking into account the modulation transfer function in ARSIS-based pansharpening methods. In: 29th Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories, 424–431, [doi: 10.3233/978-1-60750-494-8-320](#), [HAL](#).
- Oumbe, A., P. Blanc, and L. Wald, 2010. Solar surface irradiance from new meteorological satellite data. In: 29th Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories, 320–328, [doi: 10.3233/978-1-60750-494-8-320](#), [HAL](#).
- Ménard, L., L. Wald, P. Blanc and T. Ranchin, 2009. Sitting of a solar power plant: development of Web service based on GEOSS data and guidance. In: 33rd International Symposium on Remote Sensing of Environment, 5 pp. (paper 789), [HAL](#).
- Oumbe, A., P. Blanc, T. Ranchin, M. Schroedter-Homscheidt, L. Wald, 2009. A new method for estimating solar energy resource. In: 33rd International Symposium on Remote Sensing of Environment, 4 pp. (paper 773), [HAL](#).
- Oumbe, A., L. Wald, P. Blanc, and M. Schroedter-Homscheidt, 2008. Exploitation of radiative transfer model for assessing solar radiation: the relative importance of atmospheric constituents. In: EUROSUN 2008, 8 pp.
- Oumbe, A., L. Wald, P. Blanc, M. Schroedter Homscheidt, 2008. Exploitation of radiative transfer model for assessing solar radiation: the relative importance of atmospheric constituents. In: EUROSUN 2008, 1st International Congress on Heating, Cooling and Buildings, Oct 2008, Lisbonne, Portugal. ISES, CDROM, 8 pp.
- Suri, M., J. Remund, T. Cebecauer, D. Dumortier, L. Wald, T. Huld, P. Blanc, 2008. First steps in the cross-comparison of solar resource spatial products in Europe. In: EUROSUN 2008, 1st International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, Lisbonne, Portugal. CDROM, 9 pp.
- Blanc, P., and G. Monroig, 2006. Numerical line of sight stabilisation for high resolution earth observation from high orbits. In: Sixth International Conference on Space Optics, European Space Agency, 621, 5 pp.
- Mesrine, M., E. Thomas, S. Garin, P. Blanc, C. Alis, F. Cassaing, and D. Laubier, 2006. High resolution earth observation from geostationary orbit by optical aperture synthesis. In: Sixth International Conference on Space Optics, European Space Agency, 621, 6 pp.
- Nguyen, T., J.-D. Boissonnat, P. Blanc, F. Falzon, and E. Thomas, 2006. Pupil configuration for extended source imaging with optical interferometry: a computational geometry approach. In: IEEE International Conference on Acoustics Speed and Signal Processing Proceedings, II:793–796. [doi:10.1109/ICASSP.2006.1660462](#).
- Blanc, P., F. Falzon, E. Thomas, 2005. Concept multi-instrument à synthèse d'ouverture optique pour l'observation HR de la Terre depuis l'orbite géostationnaire. In: International Symposium OPTRO 2005, 4 pp.
- Thomas, C., and P. Blanc, 2005. Geometric quality of images: estimation of the MTF. In: 4th International Conference on Physics in Signal Image Processing, 2 pp.

Thomas, E., P. Blanc, F. Falzon, 2005. A new concept of synthetic aperture instrument for high resolution Earth observation from high orbits. In: Proceedings of the Symposium Disruption in Space, Marseille, France, 9 pp.

Blanc, P., E. Savaria, and F. Oudyi, 2001. Le mosaïquage d'images satellitaires optiques à haute résolution spatiale. In: 18ième Colloque Sur Le Traitement Du Signal et Des Images, GRETSI , 1029–1032.

Blanc, P., F. Oudyi, and E. Savaria, 2001. Mosaicing techniques for spaceborne optical high resolution imagery systems. In: 52nd International Astronautical Congress, 6 pp.

Poglio, T, P. Blanc, and R. Aloisi, 2000. Applicability of superresolution to the VEGETATION sensor. In: Fusion of Earth Data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images, 73–81.

Blanc, P., and L. Wald. 1998. Validation Protocol Applied to an Automatic Co-Registration Method Based on Multi-Resolution Analysis and Local Deformation Models. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing, XXXII, 2, 11–19, [HAL](#).

Blanc, P., L. Wald, and T. Ranchin. 1998. Importance and effect of co-registration quality in an example of 'pixel to pixel' fusion process. In: Fusion of Earth Data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images, 28–30, [HAL](#).

Blanc, P., T. Blu, T. Ranchin, L. Wald, and R. Aloisi. 1996. Using iterated rational filter banks within the ARSIS concept for producing 10m landsat multispectral images. In: Fusion of Earth Data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images, 69–74, [HAL](#).

2.7 Communications internationales sans actes

Blanc, P. L. Wald, 2015. Critical analysis of the use of the central-limit-theorem (CLT) in P90 meteorological scenarios for solar-powered plants. 3rd International Conference Energy & Meteorology (ICEM) 2015, Boulder, Colorado, 22-26 June 2015.

Eissa, Y., M. Korany, Y. Aoun, M. Boraiy, W. A. Magdy, S. Alfaro, P. Blanc, M. El-Metwally, H. Ghedira, L. Wald, 2015. Comparison between estimates of the surface downwelling solar irradiances under cloud-free skies extracted from the McClear and HelioClim-3 services over Egypt. 3rd International Conference Energy & Meteorology (ICEM) 2015, Boulder, Colorado, 22-26 June 2015.

Eissa, Y., P. Blanc, L. Wald, H. Ghedira, 2015. Preliminary results on modelling the monochromatic beam and circumsolar radiation under cloud-free conditions in desert environment. 3rd International Conference Energy & Meteorology (ICEM) 2015, Boulder, Colorado, 22-26 June 2015.

Realpe, A.M., C. Vernay, S. Pitaval, P. Blanc, C. Lenoir, 2015. Proposing enhanced Typical Meteorological Year for Concentrated-PV systems using long-term datasets. 3rd International Conference Energy & Meteorology (ICEM) 2015, Boulder, Colorado, 22-26 June 2015.

Wandji, W., P. Blanc, L. Wald, 2015. Towards an operational method for estimating the Photosynthetically Active Radiation in clear-sky conditions over the Earth's surface. 3rd International Conference Energy & Meteorology (ICEM) 2015, Boulder, Colorado, 22-26 June 2015.

Blanc, P., L. Wald, 2014. Yearly changes in solar radiation over New Caledonia and relations with changing atmospheric properties. In: 14th EMS Annual Meeting & 10th European Conference on Applied Climatology (ECAC), Oct 2014, Prague, Czech Republic.

Buhchholtzer, J., P. Blanc, P. Massip, C. Gauchet, B. Charbonnier, Stephanie Dubost, and D. Demengel, 2014. 3D motion reconstruction of clouds with pair of fisheye cameras. In: COST WIRE International workshop on sky camera, Patras, Greece.

- Espinar, B., Z. Qu, A. Oumbe, P. Blanc, B. Gschwind, M. Lefevre, L. Wald, M. Schroedter Homscheidt, 2014. First validation of the surface solar irradiance data set produced by the MACC/MACC-II projects. In: MACC-II Open Science Conference.
- Salamalikis V., P. Blanc, A. Kazantzidis, 2014. On the induced uncertainties in direct normal irradiance calculations under cloud-free conditions due to aerosol optical depth from MACC re-analysis data. In: 14th EMS Annual Meeting/ 10th European Conference on Applied Climatology (ECAC), 06-10 October 2014, Prague, Czech Republic.
- Wandji Nyamsi, W., P. Blanc, L. Wald, B. Espinar, 2014. A new approach for estimating Photosynthetically Active Radiation in clear sky conditions. In: 14th EMS Annual Meeting & 10th European Conference on Applied Climatology (ECAC), Oct 2014, Prague, Czech Republic.
- Espinar, B., P. Blanc and L. Wald, 2013. On the definition of the direct normal irradiance. In: International Conference Energy & Meteorology (ICEM), Toulouse, France.
- Oumbe, A., H. Bru, Z. Hassar, P. Blanc, L. Wald, Y. Eissa, P. Marpu, I. Gherboudj, H. Ghedira, D. Goffe, 2013. On the improvement of MACC aerosol spatial resolution for irradiance estimation in the United Arab Emirates, ISES Solar World Congress.
- Oumbe, A., Z. Qu, P. Blanc, M. Lefèvre, L. Wald, S. Cros, 2013. Decoupling the effects of clouds and clear atmosphere to compute the solar irradiance at surface. In: 13th EMS Annual Meeting, Reading, United Kingdom.
- Espinar, B., P. Blanc, L. Wald, C. Hoyer-Klick, M. Schroedter Homscheidt, and T. Wanderer, 2012. On quality control procedures for solar radiation and meteorological measures, from subhourly to monthly average time periods. In: EGU General Assembly 2012. Vienne, Austria, [HAL](#).
- Lefevre, M., A. Oumbe, P. Blanc, B. Gschwind, Z. Qu, L. Wald, M. Schroedter Homscheidt, C. Hoyer-Klick, A. Arola, and J.-J. Morcrette, 2012. Using MACC-derived products to predict clear-sky irradiance at surface. In: EGU General Assembly 2012. Vienne, Austria.
- Oumbe, A., Z. Qu, P. Blanc, H. Bru, and L. Wald, 2012. A new locally-adaptive method to derive direct and diffuse components from global irradiance. In: EMS Annual Meeting 2012. Lodz, Poland.
- Oumbe, A., Z. Qu, P. Blanc, H. Bru, M. Lefevre, and L. Wald, 2012. Modeling circumsolar irradiance to adjust beam irradiances from radiative transfer models to measurements. In: EMS Annual Meeting 2012. Lodz, Poland.
- Qu, Z., A. Oumbe, P. Blanc, M. Lefevre, L. Wald, M. Schroedter Homscheidt, and G. Gesell, 2012. A new method for assessing surface solar irradiance: Heliosat-4. In: EGU General Assembly 2012. Vienne, Austria.
- Qu, Z., P. Blanc, and M. Lefèvre, 2011. Is the MLB parameterization accurate enough to describe change in solar radiation with solar zenith angle? In: EGU General Assembly 2011, Vienne, Austria, [HAL](#).
- Blanc, P., M. Lefèvre, L. Wald. 2010. Assessment of performances of sun zenith angle and altitude parameterisations of atmospheric radiative transfer for spectral surface downwelling solar irradiance. 10th EMS Annual Meeting (European Meteorological Society), sept. 2010, Zurich, Switzerland.
- Blanc, P., L. Wald. 2010. On the intraday resampling of time-integrated values of solar radiation. In: 10th EMS Annual Meeting (European Meteorological Society), Sep 2010, Zurich, Switzerland.
- Thomas, C., P. Blanc, T. Ranchin, L. Wald, 2005. Geometric quality of images: estimation of the MTF. In: 4th International Conference on Physics in Signal Image processing PSIP 2005, Jan 2005, Toulouse, France, [HAL](#).

2.8 Conférences invitées nationales et internationales

Blanc, P., 2013. Improving DNI information for CSP development. Part 1: DNI definitions. *Webinar*, ISES, [lien](#).

Blanc, P., and L. Wald, 2010. High Resolution satellite estimation of the solar resource. In: *Solar Energy at Urban Scale*, edited by B. Beckers, 24–27. Compiègne, France: Université de technologie de Compiègne.

Blanc, P., 2006. Contrôle de la ligne de visée d'un instrument d'observation HR géostationnaire. Séminaire « pointage fin par la charge utile » organisé par les Centres de Compétences Techniques du CNES.

2.9 Base de données et services web scientifiques de référence

Dans le cadre des activités de recherche du centre O.I.E., j'ai participé à la réalisation et la dissémination des bases de données et services web scientifiques reconnus comme étant de référence par la communauté scientifique et ses utilisateurs. Il est à noter que la base de données HelioClim-3 a fait l'objet d'un transfert de valorisation vers la société commerciale Transvalor S.A. qui s'occupe de sa commercialisation et de la réalisation de services à valeur ajoutée.



HelioClim-3

Base de données d'irradiation solaire incidente au sol, dérivée de l'application opérationnelle de l'algorithme Heliosat-2 aux images issues de *Meteosat Second Generation*.

www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-3-for-free



McClear

Base de données d'irradiation par condition de ciel clair (sans nuage), issue des projets européens MACC (Monitoring Atmospheric Composition & Climate).

www.soda-pro.com/web-services/radiation/mcclear



MACC-RAD

Base de données d'irradiation solaire incidente au sol dérivée de l'application opérationnelle de l'algorithme Heliosat-4 aux images issues de *Meteosat Second Generation* et aux données issues des projets européens MACC (Monitoring Atmospheric Composition & Climate).

www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-4



Solar Med Atlas

Base de données d'irradiations solaires à 1 km de résolution sur les pays d'Afrique du Nord du pourtour méditerranéen dérivées des bases de données HelioClim-3 et McClear.

www.solar-med-atlas.org



Atlas du gisement solaire en région Provence Alpes Côte d'Azur

Base de données de cartes du gisement solaire à 200 m de résolution pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA)

www.atlas-solaire.fr



Solar Geometry 2

Services web de calcul de la position angulaire topocentrique du Soleil par l'algorithme *Solar Geometry 2* (Blanc and Wald, 2012).

Service web : www.soda-pro.com/web-services#solar-geometry-2

2.10 DEA et thèse de doctorat

Blanc, P. 1994. Analyse multirésolution et transformées en ondelettes appliquées aux images de télédétection. Rapport de DEA STIR, Université Rennes II et de fin d'étude de l'ENST Bretagne.

Blanc, P. 1999. Développement de méthodes pour la détection de changement. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Spécialité "Informatique temps réel – Automatique – Robotique", 212 pp, [HAL](#).

2.11 Références bibliographiques en ligne

- **Archive ouverte HAL**
[HAL - Philippe BLANC](#)
- **Google Scholar**
scholar.google.fr/citations?user=I0tNZQcAAAAJ&hl=fr

The screenshot shows the Google Scholar profile of Philippe BLANC. On the left is a small portrait photo with a link to 'Changer de photo'. To the right of the photo, the name 'Philippe BLANC' is displayed, followed by his affiliation 'MINES ParisTech / PSL Research University / ARMINES' and his research interests: 'solar energy, renewable energy, image processing, signal processing, remote sensing'. Below this, it says 'Adresse e-mail validée de mines-paristech.fr - Page d'accueil' and 'Mon profil est public'. To the right of the profile information is a table of citations:

Citations	Toutes	Depuis 2010
Citations	514	370
indice h	10	9
indice i10	11	8

Below the table, there is a section for 'Coauteurs' with a 'Modifier...' link, listing 'Wald Lucien, Mireille LEFEVRE, Armel Oumbe, Benoit Gschwind, Zh...'.

Figure 33 : Capture d'écran de l'entête Google Scholar (à la date du 27 août 2015).

- **Research Gate**
www.researchgate.net/profile/Philippe_Blanc2

3. LISTE DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Cette section présente la liste des travaux de recherche principaux réalisés uniquement sur la période 2007 à maintenant, excluant ainsi les travaux de recherche menés au sein d'*Alcatel Space Industries* et de *Thales Alenia Space* avant 2007.

- **Projet CALVAL : sélection et caractérisation de sites d'étalonnage de satellite d'observation (calibration test sites: selection and characterisation).**
Financement : Agence Spatiale Européenne (2007-2008) .
Partenaires : VEGA, ETH-Z, GAEL Consultant, Pr. Santer, BRIX Systems, MINES ParisTech/ ARMINES.
Rôles principaux : responsable d'une tâche, réalisation pour ARMINES.

Berthelot, B., R. Santer, P. Blanc, S. Saunier, S. Kocaman, 2008. Calibration Test Sites Selection and Characterisation – WP110. ESA/ESRIN, TN-WP110-001-VEGA, 193 pp.
[Lien PDF](#)

Blanc, P, 2008. Calibration Test Sites Selection and Characterisation – WP210. ESA/ESRIN, TN-WP210-001-VEGA, 22 pp.
[Lien PDF](#)

Blanc, P. and L. Wald, 2008. Image Quality – WP224, ESA/ESRIN, TN-WP224-001-VEGA, 44 pp.

[Lien PDF](#)

- **Expertise et études (2) sur les éléments clés pour le dimensionnement d'un système optique d'observation Haute Résolution de la Terre.**

Financement : Thales Alenia Space (2007-2009).

Partenaire : MINES ParisTech / ARMINES.

Rôles principaux : montage du projet, rédaction proposition technique & financière, responsable du projet, réalisation de l'étude.

Blanc, P., 2009. Eléments clés pour le dimensionnement d'un système optique d'observation Haute Résolution de la Terre. Rapport technique, 79 pp.

- **Projet PEA⁵⁰ AVALH2 : développement d'algorithmes avancés d'exploitation d'images satellitaires optiques à haute résolution spatiale pour le renseignement.**

Financement : DGA (2007-2009)

Partenaires : DGA, CNES, IGN, ONERA, MINES ParisTech / ARMINES

Rôle principal : responsable pour Armines, co-réalisation de l'étude

- **Etudes sur des données d'ensoleillement pour un projet de centrale photovoltaïque.**

Financement : TOTAL Technique Electricité & Autres Energies (2009).

Partenaire : MINES ParisTech / ARMINES.

Rôles principaux : montage du projet, rédaction proposition technique & financière, responsable de l'étude, réalisation de l'étude.

Blanc, P. and L. Wald. Données d'ensoleillement pour un projet de centrale photovoltaïque. Rapport d'étude, 10 pp.

- **Projet ATLAS-PACA : réalisation d'un atlas du potentiel solaire photovoltaïque et thermodynamique de référence en région PACA à haute résolution spatiale.**

www.atlas-solaire.fr

Financement : région PACA, ADEME et Conseil Général des Alpes Maritimes (2009-2011).

Partenaire : MINES ParisTech / ARMINES.

Rôles principaux : montage du projet, rédaction proposition technique & financière, responsable du projet, réalisation de l'étude.

Blanc, P., 2011. Atlas du potentiel solaire photovoltaïque et thermodynamique en région PACA. Rapport final du projet. 103 pp.

[Lien PDF](#)



Base de données et services web associés de cartes de l'atlas du gisement solaire en région PACA à 200 m de résolution.

Référencées notamment sur le site du Géoportail France (www.geoportail.gouv.fr).

Disponible gratuitement notamment sur le site www.atlas-solaire.fr.

- **Projet SOLAR-MED-ATLAS : réalisation d'un atlas du potentiel solaire pour les pays de l'Afrique du Nord sur le pourtour méditerranéen.**

www.solar-med-atlas.org

Financement : ministère fédéral allemand de l'environnement, de la conservation de la nature et de la sûreté nucléaire (2010-2012).

Partenaires : DLR, MINES ParisTech / ARMINES, Transvalor, Geomodel Solar, UNEP, OME,

⁵⁰ PEA : programmes d'études amont de la Délégation Générale pour l'Armement

RCREEE

Rôles principaux : responsable de deux tâches, réalisation pour ARMINES.



Base de données et services web associés de cartes de l'atlas du gisement solaire pour les pays de l'Afrique du Nord sur le pourtour méditerranéen à 1 km d résolution. Disponible gratuitement notamment sur le site www.solar-med-atlas.org

- **Projet FP7 ENDORSE (n° 262892) : réalisation d'activités de recherche et de prototypes utilisant des données GMES pour réaliser des services dans le domaine des énergies renouvelables.**

www.endorse-fp7.eu

Co-financement : commission européenne (2009-2013).

MINES ParisTech / ARMINES (coordination), DLR, iCONS, Transvalor, Flyby, Univ. ULM, Univ. Genova, ENTPE, 3E, JRC.

Rôle principal : encadrement et co-réalisation.

Blanc, P. and L. Wald, 2011. A library for computing the relative position of the Sun and the Earth. ENDORSE, D3.1, 34 pp.

[Lien PDF](#)

Espinar, B., L. Wald, P. Blanc, C. Hoyer-Klick, M. Schrodter-Homscheidt and T. Wanderer, 2011. Report on the harmonization and qualification of meteorological data. ENDORSE, D3.2, 81 pp.

[Lien PDF](#)

Schrodter-Homscheidt, M., D. Stetter, P. Blanc, Z. Qu and L. Wald, 2012. Post-processing of surface solar irradiance. ENDORSE, D3.4, 75 pp.

[Lien PDF](#)

Blanc, P., A. Boilley, N. Killius, M. Lefèvre, P. Massip, M. Schrodter-Homscheidt and L. Wald, 2012. Methods on data fusion. ENDORSE, D3.5, 71 pp.

[Lien PDF](#)

Blanc, P., B. Espinar and L. Wald, 2012. Report on the Product S1 "Local Solar Atlas". ENDORSE, D401.1, 16 pp.

[Lien PDF](#)

Espinar, B., P. Blanc and L. Wald, 2012. Report on the Product S2 "TMY for production". ENDORSE, D404.1, 12 pp.

[Lien PDF](#)



Service web et logiciels de calcul de la position angulaire topocentrique du Soleil par l'algorithme Solar Geometry 2 (Blanc and Wald, 2012).

Services web : www.soda-pro.com/web-services#solar-geometry-2

Logiciels : www.endorse-fp7.eu/science_sunposition

- **Projet d'Etudes Avancées (PEA) EFUSION : développement d'algorithmes avancés d'exploitation d'images satellitaires optiques à haute résolution spatiale pour le renseignement.**

Financement : DGA (2011-2014).

Partenaires : DGA, CNES, IGN, ONERA, MINES ParisTech / ARMINES, TELECOM ParisTech.

Rôles principaux : montage, réalisation de la proposition technique et financière, encadrement et co-réalisation pour ARMINES.

- **Projet SHC46 : contribution aux activités de recherche de la tâche 46 du programme SHC de l'AIE (cf. section IV-4.1).**

Co-financement : ADEME (2011-2016).

Rôles principaux : montage, réalisation de la proposition technique et financière, encadrement et co-réalisation pour ARMINES.

- **Projet PREDISOL : amélioration des outils d'estimation de la ressource solaire dans la zone du moyen orient (improvement of tools for predicting local solar resource in Middle East and North Africa).**

Financement : Total New Energies (2011-2014).

Partenaires : TOTAL, MINES ParisTech / ARMINES, BERTIN, MASDAR Institute (Abu Dhabi).

Rôles principaux : responsable, encadrement et co-réalisation pour ARMINES.

- **Projets FP7 MACC et MACC-II (n° 218793 ; n° 283576) : service Radiation (Radiation Service, RAD) du projet MACC (Monitoring Atmospheric Composition & Climate).**

www.gmes-atmosphere.eu

Co-financement : commission européenne (2009-2011, 2011-2013).

Partenaires : 36 partenaires européens dont le CNRS, le CEA, DLR, ECMWF et MINES ParisTech / ARMINES.

Rôle principal : participation à la réalisation pour ARMINES.

Blanc, P., B. Espinar and L. Wald, 2012. Report on direct normal irradiance standards. MACC-II. D121.1, 49 pp.

[Lien PDF](#)

- **Projet eCARE : développement de méthodes opérationnelles pour la calibration de séries temporelles de long terme d'irradiations incidentes au sol issues de la base de données HelioClim-3 par des mesures *in-situ* de court-terme.**

Co-financement : l'ADEME et les Investissement d'Avenir (2012-2015).

Partenaires : CNIM, Bertin, Transvalor, MINES ParisTech / ARMINES.

Rôles principaux : montage, réalisation de la proposition technique & financière, responsable de tâches et réalisation pour ARMINES.

Blanc, P, 2013. Note méthodologique pour la calibration intra-journalière locale de HelioClim-3 par des mesures actinométriques *in-situ*. eCARE, lot 2.3.2, 25 pp.

- **Projet FP7 DNICast (n° 608623) : développement et validation de méthodes de prévision à très court-terme (jusqu'à 240 min) du rayonnement direct en incidence normale pour l'industrie des systèmes de conversion d'énergie solaire par concentration.**

www.dnicast-project.net

Co-financement : commission européenne (2013-2016).

Partenaires : OME, CENER, Univ. Patras, Meteotest, MINES ParisTech / ARMINES, Univ. Koeln, SMHI, DLR, Univ. Cyprus, RIUUK.

Rôles principaux : responsable pour ARMINES du montage et de la réalisation de la proposition technique et financière, négociation avec la commission, responsable de deux tâches (WP : Work Package) et co-réalisation pour ARMINES.

- **Réponse à appel d'offre H2020-EO-2015 dans le thème « *Bringing EO applications to the market* » (EO-1-2015⁵¹). Le projet, nommé BISE pour "*Business Improvements in Solar Energy*", comprend un **consortium** de 11 partenaires européens (et suisse).**

Financement potentiel : commission européenne (2016-2018).

Partenaires : DLR, FMI, Univ. Oldenburg, Transvalor, Flyby, Solaïs, Meteotest, Hespul, Overspeed, iCons.

Rôles principaux : coordinateur et responsable de la réponse, participation à la rédaction de la proposition.

4. RAYONNEMENT, ACTIONS SCIENTIFIQUES NATIONALES ET INTERNATIONALES

4.1 Participation à des comités d'experts internationaux

En 2010, le ministère français de l'enseignement supérieur et de la recherche m'a nommé parmi les deux experts français pour faire partie du comité d'organisation (*MC members*) de l'action ES1002 « *Weather Intelligence for Renewable Energy* » (WIRE) du programme de coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique (COST). Cette action avait pour objectif de rassembler les différents acteurs du domaine des énergies solaires et éoliennes (centres de recherche, producteurs, distributeurs et décideurs publics) provenant de plus de 23 pays européens, dans le but de répondre à deux objectifs principaux : (1) l'amélioration des algorithmes de prévision météorologique dédiée aux énergies éoliennes et solaires et (2) l'établissement de nouveaux moyens opérationnels de gestion optimisée des moyens de productions et de stockage d'énergie éoliennes et solaires intégrés au réseau électrique.

En 2011, j'ai été mandaté par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) pour faire partie de la cinquantaine d'experts internationaux de l'Agence Internationale de l'Energie dans le cadre de la tâche 46 « *Solar Resource Assessment and Forecasting* » de son programme « *Solar Heating and Cooling* ». En particulier, je tiens le rôle de responsable d'une des quatre sous-tâches, nommée « *Advancing solar resource modeling procedures based on physical principles* ».

Depuis juillet 2014, je suis aussi expert pour l'AFNOR dans le cadre de la normalisation des standards relatifs à l'énergie solaire (AFNOR/UF82 : Systèmes de conversion photovoltaïque de l'énergie solaire).

4.2 Participation à des comités de lecture de journaux scientifiques internationaux

Depuis mars 2013, je suis éditeur associé pour la revue scientifique international de rang A "*Journal of Solar Energy Engineering*" de la société savante *American Society of Mechanical Engineers* (ASME).

Par ailleurs, je participe très régulièrement à des relectures d'articles pour des revues internationales à comité de lecture, principalement de rang A. Ainsi ai-je rédigé depuis 2012 plus de 50 rapports pour des articles soumis par exemple à *Solar Energy*, *Renewable Energy*, *MDPI Sensors*, *IEEE JSTARS* ou encore *AMT*.

4.3 Participation à des actions scientifiques nationales

Depuis mars 2012, je fais partie du [conseil scientifique du Parc Naturel Régional des Pré-Alpes d'Azur](#) (PNRPA) en charge des aspects relatifs à l'énergie. En mai 2014, j'ai été élu vice-président du conseil scientifique, confirmant l'importance des enjeux énergétiques pour le territoire.

⁵¹ ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/2448-eo-1-2015.html

A titre personnel, je suis un des fondateurs de l'Université Populaire Viennoise de l'environnement (www.uni-vie.org) qui, depuis 2010, participe à la dissémination de la connaissance scientifique relative à l'environnement en proposant des conférences-débats et ateliers gratuits et ouverts à tous. En plus de faire partie de la « direction » de cette université populaire inscrite à l'association des universités populaires de France, j'ai participé en tant que conférencier avec trois conférences : une sur l'énergie solaire et deux sur les mathématiques dans la nature. J'ai aussi organisé et animé plusieurs ateliers sur la présentation et la réalisation de fours solaires pour la cuisine.

Toujours dans le cadre de la dissémination de la culture et connaissance scientifique, j'ai participé depuis 2008 à de nombreuses fêtes de la science et des rencontres avec des élèves de collège et de lycée.

4.4 Organisation de séminaires internationaux

Séminaire “*State of the art*” de l'action COST WIRE

J'ai été le co-responsable du comité d'organisation de l'Action COST WIRE d'un séminaire à Sophia Antipolis où se sont rendus plus de 75 chercheurs, industriels ou décideurs publics provenant de toute l'Europe. Les participants ont contribué par des séries de conférences et des sessions de posters à établir l'état de l'art des techniques de prévision de la production d'énergie solaire et éolienne et de leurs utilisations par les producteurs et les distributeurs d'énergie électrique.

Réunion d'experts de la tâche 46 du programme SHC de l'AIE

J'ai organisé l'accueil d'une trentaine de chercheurs internationaux du 21 au 23 janvier 2013, à Sophia Antipolis, pour la troisième réunion d'experts de la tâche 46 du programme SHC de l'AIE (cf. section IV-4.1).

Séminaires internationaux de formation sur le rayonnement solaire

J'ai participé à l'organisation des sessions (depuis janvier 2013) du séminaire international de formation sur le rayonnement solaire donné par le centre O.I.E., en collaboration avec la société *Transvalor*. J'y ai dispensé des cours, environ 8 h. Ces séminaires, ouverts à tout public et gratuits, proposent des cours, dispensés en anglais, avec des illustrations et vidéos pour permettre une compréhension claire et facile des différents aspects du rayonnement solaire. Ces séminaires ont accueilli chaque année entre 20 et 30 ingénieurs et doctorants, provenant principalement d'Europe occidentale.

4.5 Accueils de chercheurs invités étrangers

Dans le cadre de l'action COST ou d'un partenariat académique, j'ai accueilli au sein du centre O.I.E. trois doctorants européens :

- M. Daniel Stetter, doctorant du DLR, d'avril à juillet 2011 (3 mois) ;
- M. Vassilis Salamalikis, doctorant de l'université de Patras (Grèce), en avril 2014 (1 semaine, programme COST) ;
- M. Thomas Schmidt, doctorant de l'université d'Oldenbourg (Allemagne), en juillet 2014 (3 semaines, programme COST) ;

En octobre 2015, il est prévu que M. Niels Killius, ingénieur de recherche au DLR, vienne en tant que chercheur invité pour trois mois, afin de travailler sur la caractérisation des nuages par analyse des images multispectrales de l'instrument SEVIRI embarqué sur MSG.

4.6 Distinctions

En 2005, à l'issue d'une sélection à l'échelle du groupe Alcatel-Lucent, j'ai été admis comme membre de l'*Alcatel-Lucent Technical Academy*, comité de 500 experts reconnus au sein du groupe Alcatel-Lucent (domaine d'expertise en traitement du signal et de l'image et en mathématiques appliquées).

Sur la période 2006-2007, j'ai participé à un projet de recherche ayant abouti à un dépôt de brevet (Perrin *et al.*, 2007). Ce projet de recherche a remporté le premier prix *ex aequo* de l'innovation de *Thales Alenia Space* ainsi que la médaille d'argent du prix de l'innovation de *Thales Group*.

En 2014, j'ai reçu, pour l'atlas solaire en région PACA, le Trophée d'Argent du Trophée Climat Air Energie du conseil général des Alpes Maritimes.

5. ENCADREMENTS ET ENSEIGNEMENTS

5.1 Encadrements de thèses

Co-encadrement de thèses MINES ParisTech soutenues	4 (maître de thèse)
Co-encadrement de thèses MINES ParisTech en cours	2 (maître de thèse)
Co-encadrement de thèses « extérieures » soutenues	1 (co-directeur)
Comité de pilotage de thèse « extérieures » en cours ou passées	5
Membre de jurys de thèse	5 (maître de thèse) 3 (examineur)

Depuis mon arrivée au sein de MINES ParisTech, j'ai été le maître de thèse de quatre thèses MINES ParisTech avec comme directeur de thèse Lucien Wald.

Ces thèses sont maintenant achevées, avec succès, chacune au bout de trois ans :

- M. Armel Oumbé a soutenu sa thèse MINES ParisTech, spécialité « Energétique », en novembre 2009. M. Oumbé est actuellement ingénieur de recherche pour Total New Energies, à Paris.

Oumbé, A, 2009. Exploitation des nouvelles capacités d'observation de la Terre pour évaluer le rayonnement solaire incident au sol. Thèse de doctorat de MINES ParisTech, 137 pp.

[Lien PASTEL](#)

Ecole Doctorale n°432 : « Science des Métiers de l'Ingénieur⁵² (SMI) »

Quotité d'encadrement : 33 %

- M. Pierre Massip a soutenu sa thèse MINES ParisTech, spécialité « Informatique temps réel, Robotique, Automatique », en novembre 2010. M. Massip travaille actuellement avec nous au sein du centre O.I.E., en tant qu'ingénieur de recherche.

Massip, P, 2010. Fusion de données : prise en compte des caractéristiques liées à l'imageur lors de la synthèse d'images multispectrales à haute résolution spatiale. Thèse de doctorat de MINES ParisTech, 140 pp.

[Lien PASTEL](#)

Ecole Doctorale n°84 : « Sciences & Technologies de l'Information et de la Communication⁵³ (STIC) »

⁵² Ecole doctorale SMI (Sciences des Métiers de l'Ingénieur, ED 432) commun aux Arts et Métiers ParisTech et MINES ParisTech.

⁵³ Ecole doctorale STIC (Sciences & Technologies de l'Information et de la Communication, ED 84) de l'université de Nice – Sophia Antipolis.

Quotité d'encadrement : 50 %

- M. Zhipeng Qu a soutenu sa thèse MINES ParisTech, spécialité « Energétique et Procédés », intitulée « La nouvelle méthode Heliosat-4 pour l'évaluation du rayonnement solaire au sol » en octobre 2013. M. Qu est actuellement en post-doctorat pour trois ans au ministère canadien de l'environnement « *Environnement Canada* », basé à Toronto (Canada).

Qu, Z, 2013. La nouvelle méthode Heliosat-4 pour l'évaluation du rayonnement solaire au sol. Thèse de doctorat de MINES ParisTech, 213 pp.

[Lien PASTEL](#)

Ecole Doctorale n°432 SMI

Quotité d'encadrement : 50 %

- M. Yehia Eissa a soutenu sa thèse MINES ParisTech, spécialité « Energétique et Procédés », intitulée « *Modelling the beam and circumsolar radiation under cloud-free conditions in desert environment* » le 1^{er} juin 2015. Sa thèse s'est déroulée en partenariat avec le *Masdar Institute* (Abu Dhabi) et TOTAL. Il est actuellement ingénieur de recherche (post-doc) au sein du *Masdar Institute*.

Eissa, Y. 2015. Modelling the beam and circumsolar radiation under cloud-free conditions in desert environment (Modélisation des rayonnements direct et circumsolaire par ciel clair en environnement désertique). Thèse de doctorat de MINES ParisTech, 169 pp.

[Lien PASTEL](#)

Ecole Doctorale n°432 SMI

Quotité d'encadrement : 50 %

- M. Romain Dambreville a soutenu sa thèse de l'Université de Grenoble, spécialité « Signal, image, parole, télécoms », intitulée « Prévion du rayonnement solaire global par télédétection pour la gestion de la production d'énergie photovoltaïque », le 16 octobre 2014. Le directeur de la thèse était M. Jocelyn Chanussot et a bénéficié, *in fine*, de deux co-directeurs Giorgio A. Licciardi et moi, après avoir obtenu une dérogation de l'Ecole Doctorale n°220 « Electronique, Electrotechnique, Automatique, Traitement du Signal » (EEATS)⁵⁴.

Dambreville, R., 2014. Prévion du rayonnement solaire global par télédétection pour la gestion de la production d'énergie photovoltaïque. Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, 149 pp.

[Lien PASTEL](#)

Ecole doctorale n°220 EEATS

Quotité d'encadrement : 33 %

Je suis actuellement maître de thèse de deux doctorants de MINES ParisTech (directeur de thèse : Lucien Wald) :

- M. Youva Aoun est doctorant MINES ParisTech, en deuxième année. Sa thèse, cofinancée par la région PACA et Thales Alenia Space, porte sur « l'évaluation des capacités du nouveau satellite *Meteosat Third Génération* (MTG) à estimer la concentration en aérosols et leurs propriétés ». Sa soutenance est prévue en octobre 2016.

Ecole Doctorale n°432 SMI

Quotité d'encadrement : 50 %

⁵⁴ Ecole doctorale EEATS (Electronique, Electrotechnique, Automatique, Traitement du Signal, ED 220) de l'université de Grenoble.

- M. Marc Bengulescu est doctorant MINES ParisTech en première année. Sa thèse porte sur « l'analyse de la variabilité du rayonnement solaire reçu au sol dans l'espace et le temps », avec une application à la prévision. Sa soutenance est prévue en octobre 2017.
Ecole Doctorale n°432 SMI
Quotité d'encadrement : 50 %

Je participe aussi à des comités de pilotage de thèse de laboratoires extérieurs :

- De septembre 2012 à avril 2015, j'ai fait partie du comité de pilotage de la thèse de Mme Hadja Maïmouna Diagne. Cette thèse porte sur « la gestion intelligente du réseau électrique et la prévision de la ressource solaire » et est dirigée par Philippe Lauret de l'équipe PIMENT de l'Université de la Réunion. La thèse a été soutenue en avril 2015.
- Depuis février 2014, je participe au comité de pilotage de la thèse de M. Jean Thorey (soutenance prévue en 2017). Cette thèse, intitulée « Prévision d'ensemble du rayonnement solaire pour la production photovoltaïque du parc EDF » est dirigée par M. Vivien Mallet de l'équipe CLIM de l'INRIA. Cette thèse est en partenariat avec EDF R&D.
- Depuis septembre 2014, je participe au comité de pilotage de la thèse de Mme Cécile Péschoud (soutenance prévue en 2016). Cette thèse, intitulée « Etude de la complémentarité et de la fusion des images qui seront fournies par les futurs capteurs satellitaires OLCI/Sentinel 3 et FCI/MTG » est dirigée par Mme Audrey Minghelli-Roman, du laboratoire LSIS de l'université de Toulon. Cette thèse est cofinancée par Thales Alenia Space et la région PACA.

Enfin, dans le cadre de mes activités de recherche au sein d'Alcatel Space (puis de *Thales Alenia Space*), avant 2007, je n'ai pas eu la possibilité de co-encadrer de manière « officielle » des doctorants. Cependant, j'ai pu participer à deux comités de pilotage de thèse :

- M. Sébastien Garrigues. « Hétérogénéité spatiale des surfaces terrestres en télédétection : caractérisation et influence sur l'estimation des variables biophysiques ». Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes. Thèse soutenue en 2004. Ecole Doctorale n°92 « Vie-Agro-Santé ». Directeur de thèse : Baret F., INRA, UMR Climat sol et environnement, Avignon.
[Lien TEL](#).
- Nguyen T. « *Design of interferometric telescopes* » Institut National de Recherche en Informatique. Directeur de thèse : Boissonnat JD., INRIA. Ma participation, dans le prolongement du stage de MASTER II de M. Trung Nguyen (*cf.* section suivante), s'est arrêtée dès la première année de thèse, lors de mon départ du service de recherche de Thales Alenia Space, en 2006. Il n'a malheureusement pas pu soutenir sa thèse.

5.2 Participation à des jurys de thèse

En plus de la participation *de facto* aux jurys de thèse en tant que maître ou co-directeur de thèse, j'ai été examinateur dans les jurys des trois thèses suivantes :

- M. Manolis Patriache. Mesure et modélisation de la lumière naturelle dans les canyons urbains. Thèse soutenue le 8 septembre 2014. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, école doctorale « MEGA de Lyon » ([lien TEL](#)).
Rôle : examinateur.
- M. Emeric Tapaches. Estimation du potentiel de la technologie solaire thermodynamique à concentration en climat non désertique – application à la Réunion. Thèse soutenue le 29 avril 2015. Université de La Réunion, école doctorale n° 42 « Sciences Technologies et Santé » ([lien TEL](#)).
Rôle : examinateur.

- Mme Hadja Maïmouna Diagne. *Gestion intelligente du réseau électrique Réunionnais. Prédiction de la ressource solaire en milieu insulaire*. Thèse soutenue le 28 avril 2015. Université de La Réunion, école doctorale n°42 « Sciences Technologies et Santé ». Rôle : examinateur.

5.3 Encadrements et tutorats de stages de fin d'étude de niveau MASTER II

Depuis 1999, j'ai encadré ou co-encadré 24 étudiants pour leurs stages de fin d'étude de niveau Master II (cycle ingénieur, DEA ou M2). Le tableau ci-dessous présente par ordre chronologique inversé la liste de ces encadrements ou tutorat.

Stages de fin d'études du cycle ingénieur de MINES ParisTech

Clerget C.H.	2014 (4 mois)	Développement d'un algorithme de validation et de réconciliation de données pour le problème de l'allocation de la production pétrolière. <i>Tutorat.</i>
Vives G.	2011 (5 mois)	Photovoltaïque à concentration : estimation de productible, analyse de cycle de vie, modélisation système <i>Tutorat.</i>
Wiesel J.	2005 (6 mois)	Ondelettes, compression, déconvolution. <i>Co-encadrement (50 %).</i>

Stages de Mastères Spécialisés de MINES ParisTech (entrée avec Master ou équivalent)

Pauwels M.	2012 (6 mois)	<i>Estimation and identification of small pumped hydro storage potential in south of France.</i> <i>Tutorat. Mastère spécialisé ALEF.</i>
Hassar Z.	2010 (6 mois)	<i>Towards a Performance Qualification Method for an AREVA solar collector.</i> <i>Tutorat. Mastère spécialisé ALEF.</i>
Renaud L.	2009 (6 mois)	<i>Estimation and identification of small pumped hydro storage potential in south of France.</i> <i>Tutorat. Mastère spécialisé ALEF.</i>
Realpe A.M.	2011 (6 mois)	Développement du projet de support d'un panneau de cellules photovoltaïques Easysun. <i>Co-encadrement (50 %). Mastère spécialisé EUREC.</i>

Stages de DEA et Master II

Cassar B.	2015 (6 mois)	Potentiel de l'imagerie satellite pour l'analyse du gaspillage énergétique de l'éclairage nocturne dans le but de déterminer les espaces à enjeux nécessitant des aménagements optimisés de l'offre lumineuse afin de répondre aux articles énoncés par le Grenelle de l'Environnement II <i>Encadrement. Master 2 Climat, Risques, Environnement de l'Université de Nice - Sophia Antipolis (UFR Espaces et Cultures).</i>
De Ricaud B.	2010 (6 mois)	Etablissement de modèles de prédiction « ciel clair » d'irradiations spectrales directes et diffuses par application de code de transfert radiation. <i>Encadrement. Master 2 IMMEN de l'Université de Nice - Sophia Antipolis.</i>
Nguyen T.	2005 (6 mois)	Geometric optimization for the conception of telescopes. <i>Co-encadrement (20 %). DEA Mathématiques Vision, Apprentissage de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan.</i>

Poglio T.	1999 (6 mois)	Application de la super-résolution au capteur VEGETATION. <i>Encadrement. DEA Astronomie, Imagerie et Haute Résolution Angulaire (HRA), Université de Nice - Sophia Antipolis.</i>
-----------	------------------	---

Stages de fin d'études d'ingénieur d'autres Grandes Ecoles

Vallance L.	2015 (6 mois)	Traitement d'image pour la prévision de la production photovoltaïque <i>Co-encadrement (50 %, co-encadrant B. Charbonnier, EDF R&D). Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications (ENSEEIH).</i>
Buchholtzer J.	2013 (6 mois)	Reconstruction 3D du ciel pour la prévision de production photovoltaïque. <i>Encadrement. Grenoble-INP.</i>
Gauchet C.	2011 (6 mois)	Traitement d'image Fish-Eye au sol pour la prévision de la production photovoltaïque. <i>Encadrement. Grenoble-INP.</i>
Avanthey L.	2008 (3 mois)	Analyse de la qualité géométrique des images de Météosat Seconde Génération. <i>Encadrement. Ecole Supérieure d'Informatique, d'électronique et automatique (ESIEA).</i>
Massip P.	2007 (6 mois)	Détermination de la ligne de visée par traitement numérique d'images. <i>Encadrement. Ecole Supérieure de Mécanique et d'Electronique (ESME-Sudria).</i>
Gauche E.	2006 (6 mois)	Déconvolution à PSF variable dans le champ (cas 2D séparable). <i>Encadrement. Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg (SUP'PHY Strasbourg).</i>
Monroig G.	2006 (6 mois)	Stabilisation de la ligne de visée d'un instrument d'observation de la Terre haute résolution depuis l'orbite géostationnaire. <i>Encadrement. Ecole Nationale Supérieure d'Electricité (SUPELEC).</i>
Dore S.	2005 (6 mois)	Déconvolution à PSF variable dans le champ (cas 2D séparable). <i>Encadrement. Ecole Nationale Supérieure d'Informatique et de Mathématiques Appliquées de Grenoble (ENSIMAG).</i>
Marcovici C.	2004 (3 mois)	Image analysis. <i>Co-encadrement (33 %) (co-encadrant : Mallat S., Polytechnique).Ecole Polytechnique.</i>
Aprile C.	2004 (6 mois)	Déconvolution à PSF variable dans le champ (cas 1D). <i>Encadrement. Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille (SUP'PHY-Marseille).</i>
Henriot E. et Prouillet JM.	2003 (3 mois)	Réalisation d'un outil d'évaluation de la qualité des images acquises par des instruments optiques spatiaux. <i>Encadrement. Ecole Supérieure en Sciences Informatiques (ESSI)</i>
Oudyi F.	2001 (6 mois)	Mosaïquage d'images optiques haute résolution. <i>Encadrement. Ecole Nationale Supérieure en Aéronautique (SUPAERO).</i>
Rudelle D.	2000 (6 mois)	Méthode de débruitage par paquets d'ondelettes. <i>Encadrement. Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications (ENSEEIH).</i>

5.4 Enseignements

Depuis 1996, dès le début de ma thèse et, autant que possible, lorsque j'étais employé en industrie, j'ai participé à des activités d'enseignements, à différents niveaux d'implication, et concernant différents organismes d'enseignement :

DEA et Master II

<i>Introduction aux techniques d'estimation et de détection sur des signaux RADAR</i> DEA Physique, Télédétection et Télécommunication de l'Université de Nice-Sophia Antipolis	Cours : 4 h 30 TP : 4 h 30 Eval. : 1 h 30	2 sessions 1996-1997
--	---	-------------------------

MINES ParisTech (cycle ingénieur, programme PESTO⁵⁵ du corps des mines, mastères spécialisés)

<i>La ressource solaire</i> Tronc commun cycle ingénieur, programme PESTO du corps des mines, Mastère spécialisé EUREC ⁵⁶	Cours : 6 h TP : 2 h µProjet : 10 h	6 sessions 2009-2014
<i>Métiers de l'Ingénieur Généralistes</i> Tronc commun	µProjet : 10 h	4 sessions 2000-2008

Autres mastères spécialisés

<i>The solar resource</i> Mastère spécialisé REST ⁵⁷ de Polytechnique (tronc commun)	Cours : 6 h	1 session 2014
<i>The solar resource & concentrated solar power plants</i> Mastère spécialisé REST de Polytechnique (filière CSP)	Cours : 6 h Eval. : 1 h 30	2 sessions 2012-2013
<i>La ressource solaire</i> Mastère spécialisé CHIMIE ParisTech	Cours : 3 h	3 sessions 2011-2013

Autres écoles

<i>Séminaire d'une semaine sur le traitement d'images numériques</i> Institut Supérieur d'Informatique et d'Automatique Cours ATHENS ⁵⁸	Organisation Responsabilité Cours : 6 h TP/Eval. : 7 h 30	5 sessions 2001-2005
<i>Mathématiques du traitement du signal radar</i> Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Nice-Sophia Antipolis	Cours : 16 h TP/Eval. : 8 h	3 sessions 1996-1999
<i>Introduction à la télédétection</i> Ecole Supérieure de Géomètres et Topographes	TP/Eval. : 8 h	2 sessions 2001-2002

Formation continue et en interne

<i>Introduction aux techniques de traitement d'images en télédétection</i> Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale (formation continue)	TP : 8 h	2 sessions 1998-1999
<i>Introduction à la télédétection</i> Thales Alenia Space (formation continue interne professionnelle)	TP : 4 h	4 sessions 2001-2005

Formation en ligne

Récemment, j'ai participé en tant qu'intervenant à un cours en ligne « ouvert et massif » – ou MOOC (*massive open online course*) réalisé et coordonné par l'UVED⁵⁹ (Université Virtuelle Environnement et Développement durable) intitulé « [Energies renouvelables](#) ».

⁵⁵ Programme PESTO : Programme d'Enseignement Scientifique et Technique d'Ouverture (www.dep.mines-paristech.fr/Formation/Corps-des-Mines/PESTO/)

⁵⁶ Master EUREC: Master in Renewable Energy coordinated by the Association of European Renewable Energy Research Centers (www.master.eurec.be)

⁵⁷ Master REST: Master Renewable Energy Science & Technologies (www.master-renewable-energy.com)

⁵⁸ ATHENS: Advanced Technology Higher Education Network/Socrates (www.paristech.fr/index.php/eng/Mobility/ATHENS-Programme)

⁵⁹ uved.fr/navigation/accueil.html

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdel Wahab, M., M. El-Metwally, R. Hassan, M. Lefèvre, A. Oumbe, L. Wald, 2008. Assessing surface solar irradiance in Northern Africa desert climate and its long-term variations from Meteosat images. *International Journal of Remote Sensing*, 31 (1), 261 – 280.
- Beyer, H.-G., C. Costanzo, D. Heinemann, 1996. Modifications of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images. *Solar Energy*, 56, 3, 207-212.
- Cano, D., J.-M. Monget, M. Albuissou, H. Guillard, N. Regas, L. Wald, 1986. A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellites data. *Solar Energy*, 37, 31-39.
- Diabaté, L., G. Moussu, L. Wald, 1989. Description of an operational tool for determining global solar radiation at ground using geostationary satellite images. *Solar Energy*, 42, 201-207.
- Dürr, B., A. Zelenka, 2009. Deriving surface global irradiance over the Alpine region from METEOSAT Second Generation data by supplementing the HELIOSAT method. *International Journal of Remote Sensing*, 30(22), 5821-5841.
- Eissa, Y., P.R Marpu., I. Gherboudj, H. Ghedira, T.B.M.J. Ouarda, M. Chiesa, 2013. Artificial neural network based model for retrieval of the direct normal, diffuse horizontal and global horizontal irradiances using SEVIRI images. *Solar Energy*, 89, 1–16, doi: 10.1016/j.solener.2012.12.008.
- Espinar, B., L. Ramírez, J. Polo, L.F. Zarzalejo, L. Wald, 2009. Analysis of the influences of uncertainties in input variables on the outcomes of the Heliosat-2 method. *Solar Energy*, 83, 1731-1741, doi:10.1016/j.solener.2009.06.010.
- Geiger, M., L. Diabaté, L. Ménard, L. Wald, 2002. A Web service for controlling the quality of global solar irradiation. *Solar Energy*, 73 (6), 475-48.
- Geuder, N., F. Trieb, C. Schillings, R. Meyer, V. Quaschnig, 2003. Comparison of different methods for measuring solar irradiation data. In: the 3rd International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations, 19th-21st of February 2003, Torremolinos, Spain. 9 pages.
- Grena, R., 2008. An algorithm for the computation of the solar position. *Solar Energy*, 82(5), 462–470. doi: 10.1016/j.solener.2007.10.001.
- Hammer, A., D. Heinemann, C. Hoyer-Klick, R. Kuhlemann, E. Lorenz, R. Müller, H.G. Beyer, 2003. Solar Energy Assessment Using Remote Sensing Technologies. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 423–432. doi:10.1016/S0034-4257(03)00083-X.
- Haurant, P., M. Muselli, B. Pillot, P. Oberti, 2012. Disaggregation of satellite derived irradiance maps: Evaluation of the process and application to Corsica. *Solar Energy*, 86 (11), 3168–3182. doi:10.1016/j.solener.2012.08.010.
- Hess, M., P. Köpke, I. Schult, 1998. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 831–844.
- Hiron, X., A. Hiron, V. Lyant, P. Vigne, 2013. Atlas des énergies en Provence-Alpes-Côte d'Azur. Observatoire Régionale de l'Energie, du Climat et de l'Air de PACA. 96 pp.
- Ineichen, P., R. Perez, 1999. Derivation of cloud index from geostationary satellites and application to the production of solar irradiance and daylight illuminance data. *Theor. Appl. Climatol.*, 64, 119–130.
- Ishii, T., K. Otani, A. Itagaki, K. Utsunomiya, 2013. A simplified methodology for estimating solar spectral influence on photovoltaic energy yield using average photon energy. *Energy Science & Engineering*, 1(1), 18–26, doi:10.1002/ese3.3.

- Jolliff, J. K., J.C. Kindle, I. Shulman, B. Penta, M.A.M. Friedrichs, R. Helber, R.A. Arnone, 2009. Summary diagrams for coupled hydrodynamic-ecosystem model skill assessment. *Journal of Marine Systems*, 76(1-2), 64–82. doi:10.1016/j.jmarsys.2008.05.014.
- Kato, S., T. Ackerman, J. Mather, E. Clothiaux, 1999. The k-distribution method and correlated-k approximation for shortwave radiative transfer model. *J. Quant Spectroscopy Radiative Transfer*, 62, 109–121, doi:10.1016/S0022-4073(98)00075-2.
- Kriebel, K. T., G. Gesell, M. Kästner, H. Mannstein, 2003. The cloud analysis tool APOLLO: Improvements and validations. *International Journal of Remote Sensing*, 24 (12), 2389-2408.
- Kumar, A., S. Gomathinayagam, G. Giridhar, I. Mitra, R. Vashistha, R. Meyer, M. Schwandt, and K. Chhatbar, 2013. Field experiences with the operation of solar radiation resource assessment stations in India. *Energy Procedia*, 49, 2351–2361. doi:10.1016/j.egypro.2014.03.249.
- Lefèvre M., L. Diabaté, L. Wald, 2007. Using reduced data sets ISCCP-B2 from the Meteosat satellites to assess surface solar irradiance. *Solar Energy*, 81, 240-253, doi:10.1016/j.solener.2006.03.008.
- Long, C.N., T.P. Ackerman, 2000. Identification of clear skies from broadband pyranometer measurements and calculation of downwelling shortwave cloud effects. *J. Geophys. Res.*, 105, 15609–15626, doi:10.1029/2000JD900077.
- Long, C.N., Y. Shi, 2006. The QCRad Value Added Product: Surface Radiation Measurement Quality Control Testing, Including Climatologically Configurable Limits. Atmospheric Radiation Measurement Program Technical Report, ARM TR-074, 69 pages.
- Lucas, B. D., T. Kanade, 1981. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In: proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'81).
- Madhavan, B.L., J. Kalisch, A. Macke, 2015. Shortwave surface radiation budget network for observing small-scale cloud inhomogeneity fields. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, 8, 2555–2589, doi:10.5194/amtd-8-2555-2015.
- Marie-Joseph, I., L. Linguet, M.-L. Gobinddass, L. Wald, 2013. On the applicability of the Heliosat-2 method to assess surface solar irradiance in the Intertropical Convergence Zone, French Guiana. *International Journal of Remote Sensing*, 34(8), 3012-3027.
- Mayer, B., A. Kylling, A, 2005. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use. *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 1855–1877, doi:10.5194/acp-5-1855-2005.
- Meydbray, J., K. Emery, 2012. Pyranometers, reference cells: The difference. *PV Magazine (04)*, 108–110.
- Michalsky, J., 1988. The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050). *Solar Energy*, 40(3), 227–235.
- Perez, R., P. Ineichen, K. Moore, M. Kmiecik, C. Chain, R. George and F. Vignola, 2002. A new operational satellite-to-irradiance model – Description and validation. *Solar Energy*, 73 (5), 307-317.
- Perez, R., R. Seals, A. Zelenka, 1997. Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data. *Solar Energy*, vol. 60, 1997, p. 89-96.
- Perez, R., R. Seals, J. Michalsky, 1993. All-weather model for sky luminance distribution - Preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, 50(3), 235–245, doi:10.1016/0038-092X(93)90017-I.

- Polo, J., L. Martín, and M. Cony, 2012. Revision of ground albedo estimation in Heliosat scheme for deriving solar radiation from SEVIRI HRV channel of Meteosat satellite. *Solar Energy*, 86 (1), 275–282. doi:10.1016/j.solener.2011.09.030.
- Qu, Z., B. Gschwind, M. Lefevre, L. Wald, 2014. Improving HelioClim-3 estimates of surface solar irradiance using the McClear clear-sky model and recent advances in atmosphere composition. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7 (11), 3927–3933. doi:10.5194/amt-7-3927-2014.
- Reda, I., A. Andreas, 2004. Solar position algorithm for solar radiation applications. *Solar Energy*, 76 (5), 577–589 (Corrigendum, 81, 838–838, 2007).
- Reinhardt, B., R. Buras, L. Bugliaro, S. Wilbert, B. Mayer, 2014. Determination of circumsolar radiation from Meteosat Second Generation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(3), 823–838. doi:10.5194/amt-7-823-2014.
- Remund, J., L. Wald, M. Lefèvre, T. Ranchin, J. Page, 2003. World-wide Linke turbidity information, CD-ROM published by International Solar Energy Society, In: ISES SolarWorld Congress, 16–19 June 2003, Göteborg, Sweden.
- Rigollier, C., M. Lefèvre, L. Wald, 2004. The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*, 77(2), 159–169.
- Rigollier, C., O. Bauer, L. Wald, 2000. On the clear sky model of the 4th European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method. *Solar Energy*, 68, 33–48.
- Roesch, A., M. Wild, A. Ohmura, E. G. Dutton, C. N. Long, T. Zhang, 2011. Assessment of BSRN radiation records for the computation of monthly means. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4 (2), 339–354. doi:10.5194/amt-4-339-2011.
- Ruiz-Arias, J. A., H. Alsamamra, J. Tovar-Pescador, D. Pozo-Vázquez, 2010. Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 881–893. doi:10.1016/j.enconman.2009.11.024.
- Ruiz-Arias, J. A., T. Cebecauer, J. Tovar-Pescador, M. Šúri, 2010. Spatial disaggregation of satellite-derived irradiance using a high-resolution digital elevation model. *Solar Energy*, 84 (9), 1644–1657. doi:10.1016/j.solener.2010.06.002.
- Scaramuzza, D., A. Martinelli, R. Siegwart, 2006. A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, p. 5695–5701, doi: 10.1109/IROS.2006.282372.
- Trewartha, G. T., 1954. *An Introduction to Climate*, 3rd Edn., McGraw Hill Book Co.
- Wahba G, 1990. Spline models for observational data, In the CBMS-NSF Regional. In: Conference Series in applied mathematics, Philadelphia, Pennsylvania USA, 59, XII, 169.
- Wald, L., M. Albuissou, G. Czeplak, B. Bourges, R. Aguiar, H. Lund, A. Joukoff, U. Terzenbach, H. G. Beyer, E. P. Borisenko, 2000. *European Solar Radiation Atlas*. Fourth edition, includ. CD-ROM. Edited by J. Greif, K. Scharmer. Scientific advisors: R. Dogniaux, J. K. Page. Published for the Commission of the European Communities by Presses de l'Ecole, Ecole des Mines de Paris, 290 pages, ISBN : 9782911762222.
- Walther, A., W. Straka, A.K. Heiginger, 2013. ABI algorithm theoretical basis document for daytime cloud optical and microphysical properties (DCOMP), version 3.0, Technical document, NOAA NESDIS, 66 pages.
- Watts, P. D., R. Bennartz, and F. Fell, 2011. Retrieval of Two-Layer Cloud Properties from Multispectral Observations Using Optimal Estimation. *Journal of Geophysical Research*, 116(D16), 22 pp., doi:10.1029/2011JD015883.
- Watts, P. D., R. Bennartz, F. Fell, 2011. Retrieval of two-layer cloud properties from multispectral observations using optimal estimation. *Journal of Geophysical Research*, 116 (D16), doi:10.1029/2011JD015883.

Wood, J. G., 1999. Solar Radiation Sensor. Brevet WO 99/13359.

Wood, J. G., 2007. User manual for the sunshine pyranometer SPN1, Delta-T Devices Ltd., 43 pages.

Zelenka, A., R. Perez, R. Seals, D. Renné, 1999. Effective accuracy of satellite-derived hourly irradiances, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 62, 1999, 199-207.